



*Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos,
Canales y Puertos.*
UNIVERSIDAD DE CANTABRIA



DISEÑO Y DESARROLLO DE UN SISTEMA EXPERIMENTAL PARA LA REALIZACIÓN DE ENSAYOS DE FRACTURA CON PROBETAS MINI-CT A BAJA TEMPERATURA

Trabajo realizado por:

Gonzalo Díaz Bezanilla

Dirigido:

Borja Arroyo Martínez

Sergio Cicero González

Titulación:

**Máster Universitario en Integridad y Durabilidad
de Materiales, Componentes y Estructuras.**

Santander, septiembre de 2021

TRABAJO FIN DE MÁSTER

ÍNDICE

1. INTRODUCCION Y OBJETIVOS.....	4
1.1. INTRODUCCIÓN.....	4
1.2. OBJETIVOS DEL PRESENTE TFM	5
2. ESTADO DEL ARTE	7
2.1. MARCO REGULATORIO Y CIENTÍFICO EN LA INDUSTRIA NUCLEAR	11
2.2. ENSAYOS DE FRACTURA	16
2.2.1. Medida de la tenacidad a fractura en régimen elástico lineal y condiciones de deformación plana y carga estática (K_{IC})	17
2.2.2. Dimensiones de la probeta a ensayar.....	20
2.2.3. Orientación del plano de agrietamiento.....	21
2.2.4. Características exigidas a la grieta	22
2.2.5. Realización del ensayo de fractura	25
2.2.6. Cálculo e interpretación de los resultados	27
2.3. CARACTERIZACIÓN EN FRACTURA OPTIMIZANDO EL MATERIAL	32
2.3.1. Probetas reconstruidas.....	33
2.3.2. Probetas miniatura.....	35
2.4. PROBETAS MINI-CT y tratamiento en la normativa	38
3. PROPUESTA EXPERIMENTAL 0.16C(T)	40
3.1. GEOMETRIAS DE LA PROBETA MINI-CT Y RANURADO LATERAL	40
3.2. PROPUESTA DE GEOMETRÍA DE PROBETA Y PREPARACION.....	43
3.2.1. Geometría de probeta Mini-CT empleada.....	43
3.2.2. Prefisuración y medición del avance de grieta durante el ensayo	46
3.3. MONTAJE EXPERIMENTAL PARA ENSAYOS DE MINI-CT A BAJAS TEMPERATURAS.....	50
3.3.1. Equipamientos estándar a emplear	50
3.3.2. Diseño específico de utillajes para el ensayo de 0.16T C(T).....	52
3.4. PARÁMETROS DE ENSAYO Y ACCIONES TRAS LA FINALIZACIÓN DEL MISMO.....	64
3.4.1. Parámetros de control durante el ensayo	64
3.4.2. Acciones inmediatas tras la finalización del ensayo.....	64
3.5. TRATAMIENTO EXPERIMENTAL DE LOS DATOS.....	64
3.5.1. Obtención de K_{Jc}	65
3.5.2. Obtención de T_0	68

4.	RESULTADOS: PRIMEROS ENSAYOS DE PRUEBA	69
4.1.	RESULTADOS DIRECTOS DEL ENSAYO.....	69
4.1.1.	Evaluación de la superficie de fractura y cálculo de a_0	70
4.1.2.	Obtención de curva carga vs desplazamiento en línea de carga	70
4.2.	CÁLCULO DE K_{Jc}	71
5.	CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO	73
5.1.	CONCLUSIONES	73
5.1.1.	Conclusiones sobre probetas mini-CT	73
5.1.2.	Conclusiones sobre la puesta a punto experimental	76
5.2.	TRABAJO FUTURO	77
6.	BIBLIOGRAFÍA.....	78

1. INTRODUCCION Y OBJETIVOS

1.1. INTRODUCCIÓN

El 28 de noviembre de 2018, la Comisión Europea presentó su visión estratégica a largo plazo para una economía próspera, moderna, competitiva y neutra desde el punto de vista del clima de aquí a 2050.

La estrategia muestra cómo Europa puede liderar el camino hacia la neutralidad climática mediante la inversión en soluciones tecnológicas realistas, la capacitación de los ciudadanos y la armonización de la acción en ámbitos clave como la política industrial, la financiación o la investigación, garantizando al mismo tiempo la justicia social para una transición justa. La UE debe reducir sus emisiones un 80% por debajo de los niveles de 1990 a través de reducciones domésticas y se establecen hitos intermedios (reducciones del orden del 40 % en 2030 y 60% en 2040). Los principales sectores responsables de las emisiones de Europa, generación de energía, industria, transporte, edificios y construcción, así como la agricultura, deben hacer la transición hacia una economía de baja emisión de carbono de una forma rentable.

En este ámbito, la Unión Europea ha definido unos objetivos muy claros a corto y a largo plazo para llevar a cabo una transición energética hacia una energía autosostenible y conseguir una economía climáticamente neutra en 2050. El éxito de esta transición requiere de una combinación de eficiencia energética y energías de baja emisión de carbono en todos los sectores de la economía. En particular la industria y el sector del transporte van a necesitar un cambio activo hacia la electricidad para alcanzar este objetivo.

Los escenarios que se plantean de cara al 2050 en cuanto a la producción eléctrica, se puede intuir que tendrán que basarse en una combinación de las plantas nucleares ya existentes, así como la construcción de nuevas plantas y de nuevos sistemas nucleares. La seguridad y operatividad de estos sistemas recae en una profunda estrategia en la que la integridad estructural de los materiales juega un papel muy importante.

Debido a las limitaciones, bien por disponibilidad de material, bien por las implicaciones de la irradiación en el muestreo y en el ensayo, para obtener medidas fiables de resistencia a fractura, el uso de probetas de pequeño tamaño es necesario para que la industria nuclear cumpla con las directivas de Seguridad Nuclear. Se ha comprobado que es posible realizar medidas de tenacidad a fractura utilizando probetas de pequeño tamaño, tanto en condiciones de materiales irradiados como sin irradiar, aunque todavía se requieren algunos esfuerzos para alcanzar una regulación Europea de aceptación general de estos enfoques, mediante la demostración de su aplicabilidad con una base de datos suficientemente grande que cubra gran variedad de materiales y de condiciones de irradiación que sean representativos de las condiciones de operación a largo plazo.

1.2. OBJETIVOS DEL PRESENTE TFM

En el citado contexto, una geometría de probeta que lleva estudiándose algunos años es la conocida como mini-CT, que básicamente consiste en una probeta tipo compacta de 4mm de espesor que, siendo semejante (salvo en algunos aspectos que se tratarán más adelante en este TFM) permite la caracterización en fractura según la orientación deseada minimizando el material hasta tal punto que varias de ellas puedan ser obtenidas a partir de mitades de probeta Charpy o PCCV ya ensayadas.

Así, el objetivo del presente TFM es llevar a cabo el diseño, construcción y puesta a punto de un sistema experimental para la realización de ensayos de fractura en probetas 0.16T C(T) en condiciones de temperatura controlada, con cuya utilización pueda posibilitarse la determinación de la temperatura de referencia, T_0 , con todas las garantías.

Para ello, en primer lugar, se ha realizado una revisión general de la caracterización en fractura de materiales metálicos, particularmente en lo referente a aceros, así como de las características particulares de las conocidas como mini-CT, o ya bien 0.16T C(T), cuyo espesor nominal es de 4mm.

Tras ello, se ha definido la geometría exacta de probeta mini-CT a emplear (dentro de algunas variantes que existen), así como la forma de llevar a cabo la medida de la propagación de grieta durante los ensayos.

Con todo ello se ha procedido al diseño, construcción, validación, re-diseño y puesta a punto final de todos los elementos necesarios para la realización de los citados ensayos. Debe reseñarse que este tipo de experimentación es totalmente novedoso dentro del grupo de investigación donde se ha desarrollado el TFM, y cuenta con escasas experiencias previas en España, por lo que, aunque a priori pueda parecerlo, ninguna de las cuestiones aquí tratadas ha sido tarea menor, suponiendo algún tipo de adaptación/innovación frente a los ensayos de fractura convencionales.

Finalmente, el dispositivo experimental de ensayo puesto a punto ha sido validado mediante la realización de un ensayo real a baja temperatura, cuyos resultados han sido evaluados mediante una hoja de cálculo Excel programada de acuerdo a la normativa correspondiente para la obtención de la tenacidad a fractura K_{Jc} y la aplicación de las censuras y correcciones pertinentes.

2. ESTADO DEL ARTE

La viabilidad de las probetas miniatura, concretamente Mini-CT para la evaluación en fractura de propiedades mecánicas ya ha sido demostrada [1]. En base a esto, existen en la actualidad proyectos de investigación enfocados a unir esfuerzos europeos e internacionales para establecer los pilares de la validación de la tenacidad a fractura en probetas miniatura y alcanzar el cambio en los códigos y normas requeridos por las autoridades reguladoras internacionales. En concreto, este trabajo de fin de máster surge de un proyecto denominado FRACTESUS [2], que trata de la caracterización de la temperatura de transición en aceros de vasija nuclear mediante el uso de probetas 0.16T C(T), y que tratará de incluir en una segunda fase, la implementación de sus conclusiones ante los entes regulatorios, códigos, comités de estandarización, la industria y la comunidad internacional para poner en común y optimizar la experiencia y los recursos disponibles.

El proyecto anteriormente citado y otros tratan, de una manera continua, de mejorar la seguridad nuclear, la seguridad y la protección frente a la radiación y contribuir de manera notable a la descarbonización de los sistemas energéticos de una forma segura y eficiente.

Esta necesidad parte de que la mayor parte de las plantas nucleares de Europa están en la segunda mitad de su vida operativa y necesitan cumplir con unos requisitos de seguridad cada vez mayores que define la directiva de Seguridad Nuclear. En la mayoría de los manuales de gestión del envejecimiento en plantas nucleares, el envejecimiento

de la vasija del reactor a presión RPV es el número uno en la lista de preocupaciones, puesto que la vasija es la primera barrera para evitar la salida de material radiactivo al ambiente, y un fallo de la vasija en escenarios normales o de accidente, por diseño, no puede ocurrir, además no se puede reemplazar y sufre de fragilización, endurecimiento o reducción de la tenacidad, como consecuencia de la temperatura y la exposición a la radiación neutrónica.

La fragilización por irradiación de los aceros férricos es el principal mecanismo de envejecimiento que afecta a las vasijas de presión de los reactores nucleares de agua ligera. Es un mecanismo de degradación dependiente del tiempo que puede llegar a condicionar la operación y la vida útil de las plantas en operación. La evaluación del efecto de la radiación neutrónica sobre las características mecánicas de las vasijas a presión de los reactores y el entendimiento de los mecanismos del daño por irradiación han recibido una gran atención durante años por parte de organismos internacionales, centros de investigación, organismos reguladores y empresas eléctricas. La degradación de la vasija, RPV, ha estado considerada desde el principio del programa nuclear en Europa, y, por lo tanto, fueron desarrollados planes de seguimiento para monitorizar esa fragilización.

La evaluación de la integridad estructural de un componente en términos de mecánica de fractura significa que se admite la existencia de defectos o grietas en el material pero que la operación es segura mientras que el tamaño de estos defectos no alcance un valor crítico. La determinación del tamaño crítico del defecto se establece comparando el llamado factor de intensidad de tensiones, K_I , que incorpora tanto las condiciones de contorno como el modo de carga, la geometría del componente y el tamaño del defecto, con su valor crítico, que se denomina tenacidad de fractura, K_{IC} , que es una propiedad del material.

El caso de la evaluación de la integridad estructural de la vasija a presión de reactores nucleares no es esencialmente diferente de la de otros componentes convencionales. La única gran diferencia es que el ambiente de operación de la vasija es muy agresivo, debido al bombardeo de neutrones procedentes del núcleo que provoca por un lado una alta fragilización del material y por otro lado su activación radioactiva. Esta fragilización del material de la vasija debe ser cuantificada para así asegurar una operación segura de la planta. Así, para cada condición de operación se debe calcular el factor de intensidad de tensiones y la tenacidad de fractura del material en función de la fluencia recibida.

El daño por irradiación neutrónica puede ser entendido como un fenómeno multi-escala. Es decir, desde que incide un neutrón en la red cristalina de un metal y produce un defecto primario, hasta que las propiedades mecánicas del material se ven afectadas, la escala de tiempos va desde los pico-segundos a décadas y la dimensional desde el nivel atómico hasta el tamaño de la vasija. Este proceso multi-escala hace que la fragilización por irradiación sea un proceso complicado, principalmente porque hay partes del proceso que no se pueden cuantificar. A escala atómica, cuando un material metálico es bombardeado con neutrones se producen dos efectos. Por un lado, interacciones inelásticas con el núcleo de los átomos que dan lugar a productos de transmutación y a la aparición de helio e hidrógeno en la estructura. Además, se producen interacciones elásticas, en las que los neutrones incidentes transfieren energía a los átomos de la red cristalina a través de colisiones elásticas y los desplaza de su posición en la red.

A través de un proceso iterativo, se forma una cascada de desplazamientos. Cerca de un 10% de las vacantes e intersticiales que se forman inicialmente sobreviven a la evolución de la cascada y provocan: a) la formación de un defecto en la microestructura que la endurece; b) la formación de huecos; c) la redistribución de elementos en la aleación por segregación inducida por irradiación y d) posibles transformaciones de fase. Todos estos efectos microestructurales para el material de la vasija se traducen en un endurecimiento de la matriz, la formación de precipitados ricos en cobre y la segregación de elementos fragilizadores en el borde de grano

El endurecimiento del material produce a su vez un desplazamiento de la temperatura de transición dúctil frágil. Este desplazamiento de la temperatura de transición a temperaturas más altas significa que para el material irradiado la fractura frágil ocurre a temperaturas más elevadas que para el material sin irradiar.

Se debe determinar la variación de la temperatura de transición del material de la vasija con la fluencia neutrónica, para asegurar la integridad de la vasija tanto en la operación normal de la planta como en condiciones de accidente dentro del marco de los llamados Programas de Vigilancia.

Estos programas de seguimiento se hacen normalmente con cápsulas de vigilancia que contienen probetas Charpy ($10 \times 10 \times 55 \text{ mm}^3$), y en algunos casos probetas de tenacidad a fractura, del mismo material que la vasija, introducidas en la propia vasija y que están sometidas a las mismas condiciones de irradiación neutrónica con diferentes intensidades en función de su ubicación dentro de la misma. Aunque el ensayo Charpy no provee de una medida directa de la tenacidad a fractura, las probetas Charpy fueron

elegidas originalmente debido a las limitaciones de espacio y al nivel de experiencia en mecánica de la fractura, que en los años 60 no había alcanzado un grado completo de desarrollo. Estas capsulas de vigilancia están llegando a su final y hay muchos reactores que no tienen ya material disponible de vigilancia disponible en el reactor, o no tienen suficiente material de archivo para extender sus programas de vigilancia y por ello no tienen la capacidad de hacer frente a programas apropiados de vigilancia mediante ensayos con los que respaldar la operación a largo plazo.

Gracias a las mejoras en la caracterización mecánica y a las técnicas no destructivas, se puede identificar la presencia de heterogeneidades locales en el material, así como pequeños defectos en las grandes piezas de forja como son la cabeza del reactor, la vasija, el generador de vapor o el presurizador. Para abordar el problema de las propiedades locales del material, el uso de probetas de pequeño tamaño es esencial.

Para hacer frente a estas cuestiones surge la necesidad de la utilización de probetas miniatura para medir la tenacidad a fractura directamente y la probeta referencia más empleada en la bibliografía es la Mini-CT (Compact Tension), que permite extraer hasta 8 probetas de una probeta Charpy ensayada. Este enfoque intenta incrementar el nivel de seguridad en la evaluación de aceros de vasija y reducir la incertidumbre significativamente mediante:

1. la medida directa de la tenacidad a fractura en vez del cálculo semi empírico basado en las medidas Charpy.
2. incrementar significativamente la base de datos de vigilancia aumentando así la confianza en los datos.
3. la caracterización de las propiedades locales del material en caso de haber heterogeneidades en el material.

Este innovador acercamiento también busca los requerimientos para la descarbonización, la seguridad en el suministro de energía y aumentar la competitividad de la energía nuclear europea a través de una operación a largo plazo con mayor eficacia de costes. La operación a largo plazo de centrales nucleares será posible si puede ser contrastada por los programas de vigilancia extendida. El material de las probetas Charpy ensayadas será usado para averiguar si las vasijas han sufrido la fragilización usando las probetas miniatura C(T). La operación a largo plazo de las centrales permite la conservación de un suministro seguro de energía a la vez que se mantiene un nivel bajo de emisiones de carbono.

Estos avances pueden ser también implementables en las centrales Gen III+ y futuros sistemas nucleares. Los materiales estructurales de las centrales del futuro, y en

particular de las Gen IV y los sistemas de fusión, necesitaran lidiar con condiciones muy duras de irradiación. Los programas de cualificación proveen de una mayor fuerza en el desarrollo de nuevos materiales y tecnologías.

El avance en los aspectos anteriormente citados lleva siendo abordado durante los últimos años mediante programas de investigación aplicada. En la actualidad, entre otros, cabe destacar el proyecto FRACTESUS [2], que propone un enfoque global desde diferentes puntos de vista y perspectivas:

- las partes interesadas (entes reguladores, explotadores, etc) hace posible identificar las partes involucradas y su relación
- identificar estas interacciones con otros proyectos existentes o pasados
- identificar los puntos abordados para ser usados en la práctica mediante la implementación por el marco regulatorio
- cuestiones o aplicaciones fundamentalmente científicas para generar conocimiento para cuestiones futuras

2.1. MARCO REGULATORIO Y CIENTÍFICO EN LA INDUSTRIA NUCLEAR

El objetivo en este aspecto es sustentar la operación a largo plazo de las vasijas de los reactores. Todas las regulaciones nucleares nacionales e internacionales están basadas en la profundidad y las barreras múltiples para evitar que las radiaciones dañinas se liberen al medio ambiente y al público. Una rotura súbita de la vasija del reactor en la zona del *beltline* (zona de mayor irradiación por proximidad a las reacciones nucleares) desencadenaría inevitablemente una fusión del núcleo, lo que se considera el mayor accidente nuclear que puede ocurrir. Las medidas de contención están limitadas a una planta de emergencia, el edificio de contención y zonas anejas, enfriamiento de contención para reducir la presión interna, el alivio de hidrógeno para evitar una explosión, o fusión del núcleo. Las regulaciones están basadas en acercamientos deterministas o probabilistas o una combinación de ambos para excluir una rotura o para limitar la probabilidad de una fisura a través de todo el espesor a 10^{-6} eventos por reactor y por operación al año. Este tipo de análisis determinista y probabilista no debería ser una metodología competitiva puesto que una aproximación determinista necesita basarse en estimaciones conservadoras que son probabilistas por naturaleza.

Debido al envejecimiento neutrónico y térmico, la vasija se fragiliza a medida que pasan los años de operación. A este respecto las regulaciones son las encargadas de limitar esa fragilización. La evaluación de la fragilización en todo el mundo está basada metodologías semi empíricas basadas en la medida de la energía rotura Charpy de las probetas de vigilancia irradiadas en las centrales nucleares. Esta metodología de los programas de vigilancia ha sido mejorada durante los últimos años ante la posibilidad de que las centrales nucleares puedan operar más allá de su vida inicial de diseño. Así, en los programas de gestión de vida de las centrales se considera la posibilidad de aplicar nuevas técnicas de ensayo que permitan utilizar probetas pequeñas, puesto que el material irradiado es escaso, y obtener la máxima información posible sobre las características mecánicas del material.

Una de las mejoras más significativas es la posibilidad de aplicar el concepto de la Curva Maestra (Master Curve) desarrollado por Wallin [3]. Este concepto engloba nuevos métodos estadísticos y una mejora del entendimiento de los ensayos de tenacidad de fractura elastoplástica para definir la variación de la tenacidad de fractura con la temperatura en la zona de transición, utilizando únicamente datos de ensayos de tenacidad de fractura. Además, la curva maestra explica la dispersión de los resultados de tenacidad de fractura en la zona de transición y el efecto del tamaño de la probeta. La principal ventaja en la aplicación de la “Master Curve” es que sólo sería necesario realizar ensayos de tenacidad de fractura a una temperatura, dentro de la zona de transición, para determinar la llamada temperatura de referencia T_0 a través de un análisis estadístico.

Para eliminar la parte empírica del método Charpy y aprovechar la recién ganada visión de la curva maestra (Master Curve), los reguladores han establecido un marco que nos permite el uso de la Curva Maestra bien cómo código o bien cómo análisis caso por caso. Sin embargo, para permitir la operación a largo plazo, es necesario que las probetas del material que han superado la vida económicamente establecida de la central nuclear, la cual es típicamente unos 30 o 40 años para las plantas Gen II, sean ensayadas a tenacidad a fractura. No obstante, el material de vigilancia remanente que queda es generalmente insuficiente para aplicar este programa y solo la demostración y aceptación de que el cálculo de la tenacidad a fractura mediante las probetas C(T) miniatura por los órganos regulatorios puede resolver esta cuestión.

Existe una gran labor científica en este campo, que continúa creciendo y que descansa en la gran cantidad de trabajo realizado. La relación entre grietas y tensión crítica, el factor de intensidad de tensiones fue establecido en 1974 por Richie, Knot y Rice [4]. La

dispersión de los datos en la zona de transición fue formalizada por Wallin en 1984 [5]. La publicación científica clave de Wallin data de 1991 y permitió la normalización de la forma de la curva de transición y allanó el camino de la estandarización [3].

Basándose en estas dos investigaciones fundamentales la metodología para el uso de probetas Mini-CT para la evaluación de la tenacidad a fractura fue desarrollada y llevada a cabo, con el uso de probetas miniatura C(T) extraídas de probetas Charpy irradiadas, por primera vez en 2006 [6].

Los objetivos científicos en este camino, por ejemplo, en el proyecto FRACTESUS [2] radican en demostrar la fiabilidad y la confianza mejorada del uso de probetas de pequeño tamaño para medir la resistencia a la fractura en materiales estructurales (en particular materiales “nucleares”), proporcionando un método innovador para caracterizar materiales de muy altas prestaciones en situaciones críticas (fallos estructurales). Esto permitirá a la industria nuclear europea operar en condiciones más seguras y eficientes, especialmente en el caso de reactores Gen II y los futuros Gen III (en las etapas de diseño y de operación).

Es más, una vez demostrado, los órganos reguladores y de estandarización también serán capaces de incorporar estas innovaciones a las regulaciones nucleares, normas y procedimientos.

El impacto económico en el actual parque europeo de centrales nucleares es evidente ya que no solo reduce el coste de la caracterización mecánica en los programas de operación a largo plazo, sino que previene situaciones inesperadas como pueden ser fallos estructurales o paradas operativas.

Por otra parte, el impacto no se limita solo a los reactores Gen II y Gen III, los generadores Gen IV y los reactores nucleares de fusión también tienen que lidiar con una alta demanda de caracterización mecánica y programas de integridad estructural, con limitaciones parecidas en términos de disponibilidad de material a las que se dan en las actuales centrales nucleares.

El alto nivel de conocimiento desarrollado durante los próximos años tiene otro importante resultado, que consiste en la generación de una comunidad con grandes habilidades en la en la caracterización a fractura que pueden proveer de experiencia en ese campo a la industria nuclear europea y liderar ese campo a nivel internacional, así como proveer de datos de fractura de alta calidad sujetos a un plan de gestión de datos que sea “Open data”, accesible e interoperable.

Después del cierre de una serie reactores de prueba de materiales (por ejemplo, HALDEN, OSIRIS...) la capacidad de obtener materiales irradiados se ha convertido en una cuestión crítica, así que es imprescindible la optimización de la geometría de las probetas y las probetas C(T) miniatura claramente ofrecen una oportunidad para aprovechar el reducido espacio de irradiación disponible con un mayor número de probetas. En concreto, los resultados que se obtengan presentarán beneficios para los tipos de instalaciones venideros.

Los reactores o centrales de generación II (Gen II) están construidas en las décadas de los años 70, 80 y 90 del pasado siglo. Representan la mayor parte de los reactores actualmente en funcionamiento en el mundo.

Las centrales de generación III y III+ (Gen III y Gen III+) están constituidas por centrales cuyo diseño resulta de un desarrollo de las centrales Gen II y que llevan ciertas mejoras, basadas en la experiencia adquirida en las centrales nucleares actuales. Estos adelantos afectan sobre todo a los sistemas de seguridad, a la operabilidad, a la fiabilidad y a la estandarización de los diseños. Las centrales nucleares actualmente en construcción son de generación III.

Las generaciones III y III+ son reactores con una evolución mejorada de la generación II. Incluyen sistemas de seguridad pasivos, cuya acción se debe a fenómenos físicos naturales, como la convección natural y la gravedad y que actúan por sí mismos cuando la central se desvía de su modo normal de operación sin que nada los tenga que activar. No necesitan ningún tipo de energía eléctrica externa.

Los reactores de tercera generación en construcción hoy en día se pueden dividir en dos grupos distintos:

- Reactores evolutivos de agua en ebullición: ABWR (Advanced Boiling Water Reactor) de Toshiba y GE, BWR 90+ de Westinghouse, reactor pasivo ESBWR de GE y el reactor simplificado SWR-1000 de Areva.
- Reactores avanzados de agua a presión: AP-600 y el AP-1000 de Westinghouse, los evolutivos PWR System 80+ de Westinghouse, APWR de Mitsubishi y EPR Europeo de Areva.

Las centrales de generación IV constituyen una serie de proyectos e iniciativas para desarrollar varios sistemas nucleares muy innovadores. Ofrecen ventajas con respecto a las centrales nucleares actuales en cuanto a sostenibilidad, economía, seguridad, fiabilidad y protección física. Estas centrales se encuentran, en su mayoría, en la fase

de diseño y su desarrollo conlleva grandes desafíos, especialmente en aspectos de materiales y combustibles. Se espera que puedan estar en operación comercial en los próximos 15 a 30 años.

La Gen IV está compuesta por una serie de diseños genéricos. Suponen un gran avance, ya que pretenden desarrollar nuevos diseños sin olvidar las lecciones aprendidas de la experiencia acumulada de los reactores de las anteriores generaciones. Para su desarrollo se parte de ciertos principios como son:

- **Sostenibilidad:** Deben promover la disponibilidad de sistemas a largo plazo y el aprovechamiento de combustible para la producción de electricidad en todo el mundo, minimizando el volumen y el periodo de gestión de los residuos radiactivos.
- **Economía:** Deben ofrecer más ventajas económicas que otras fuentes de energía durante el ciclo de vida operativa y equiparar su nivel de riesgo financiero con el de otros proyectos energéticos.
- **Seguridad y fiabilidad:** Los diseños deben reducir al mínimo la probabilidad y magnitud de daños en el núcleo del reactor y eliminar la necesidad de adoptar medidas de emergencia fuera del emplazamiento.
- **Resistencia a la proliferación y protección física:** Deben constituir la vía menos deseable y atractiva para la utilización de los materiales para usos no pacíficos de la energía nuclear.

Una de las novedades de la generación IV es que los diseños pueden no estar exclusivamente orientados a la producción de energía eléctrica, sino que pueden tener otras aplicaciones como la generación de hidrógeno, grandes sistemas de transporte o, simplemente, generación de calor.

Existen dos iniciativas internacionales para desarrollar estos diseños avanzados que podrían funcionar hacia el año 2030 y que cumplirían con los principios establecidos:

- **GIF (Generation IV International Forum).** Participan Estados Unidos y Francia, además de otros países occidentales y de Extremo Oriente, y que coordina la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico (OCDE).
- **INPRO (International Project on Innovative Nuclear Reactors and Fuel Cycles).** Promovida por el Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA) y en el que participan la Unión Europea, Rusia y otros países.

Los principales diseños de reactores de generación IV que se están desarrollando son los siguientes:

- Reactor rápido refrigerado por gas (GFR).
- Reactor de muy alta temperatura (VHTR).
- Reactor supercrítico refrigerado por agua (SCWR).
- Reactor rápido refrigerado por sodio (SFR).
- Reactor rápido refrigerado por aleación de plomo (LFR).
- Reactor de sales fundidas (MSR).

2.2. ENSAYOS DE FRACTURA

El ensayo para la obtención de la tenacidad a fractura K_{IC} ha exigido muchos esfuerzos para determinar los criterios que garanticen, mediante ensayos sencillos y reproducibles, la obtención de las condiciones previstas por la definición de K_{IC} .

Los trabajos de Srawley y Brown en 1966 contribuyeron en gran medida a establecer una metodología normalizada para la determinación de K_{IC} . Estos trabajos condujeron a la adopción por ASTM de la Norma E-399 [7], que se editó en su primera edición en el año 1974, para un método de medida de K_{IC} . Esta norma es actualmente de aceptación general para medir el factor crítico de intensidad de tensiones, en Modo I (apertura a tracción perpendicular a los bordes de la grieta) y deformación plana en condiciones de carga estática. En Europa tenemos en el momento actual la Norma EN ISO 12737 [8], que juntamente con la británica BS:7448 [9], confieren el conjunto de Normas para caracterizar, el parámetro más importante de la tenacidad de un material, por dos razones:

1. en esas condiciones ocurren la mayoría de las roturas catastróficas en la práctica.
2. representa un valor mínimo de la tenacidad del material cargado estáticamente y, por tanto, permite el diseño con la máxima seguridad de estructuras para las que no se prevén cargas dinámicas.

2.2.1. Medida de la tenacidad a fractura en régimen elástico lineal y condiciones de deformación plana y carga estática (K_{IC})

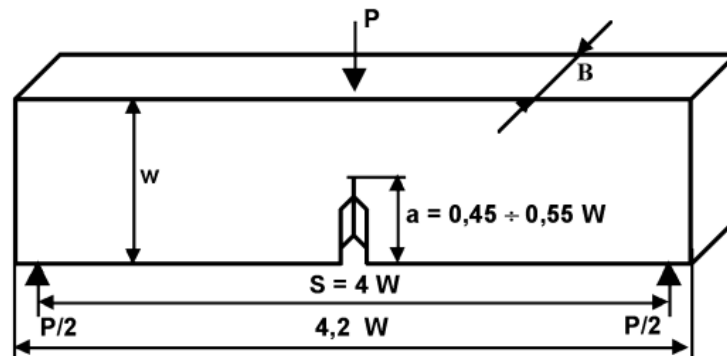
En principio, cualquier probeta agrietada para la que pudiera calcularse un único valor del factor de intensidad de tensiones en función de la carga externa aplicada sería apropiada para la determinación experimental de K_{IC} siempre que al alcanzarse la carga crítica de propagación de la grieta se cumplieran las condiciones de deformación plana y que el análisis elástico lineal de tensiones siguiera siendo aplicable. La experiencia acumulada, como consecuencia de la aplicación de la Norma ASTM, permite asegurar que si se siguen sus recomendaciones, que pueden parecer muy tediosas, esas condiciones se dan en el ensayo y el valor de K_{IC} obtenido es verdaderamente una propiedad del material [10]. Las Normas indicadas sugieren distintos tipos de probetas, siendo las más utilizadas las probetas de flexión (plegado con tres puntos de apoyo) y las probetas compactas (tracción), cuyas formas y dimensiones pueden verse en la Figura 1.

Las probetas deben tener una grieta lo más perfecta posible, de dimensión nominal, $B=a=W/2$ previa al ensayo. Esta fisura se genera por un proceso de fatiga sometiendo la probeta a carga variable de flexión o tracción, sin superar unos ciertos límites. Con objeto de asegurar que el agrietamiento por fatiga va a producirse en el lugar correcto, a las probetas se le mecaniza una entalla previa a la fatiga.

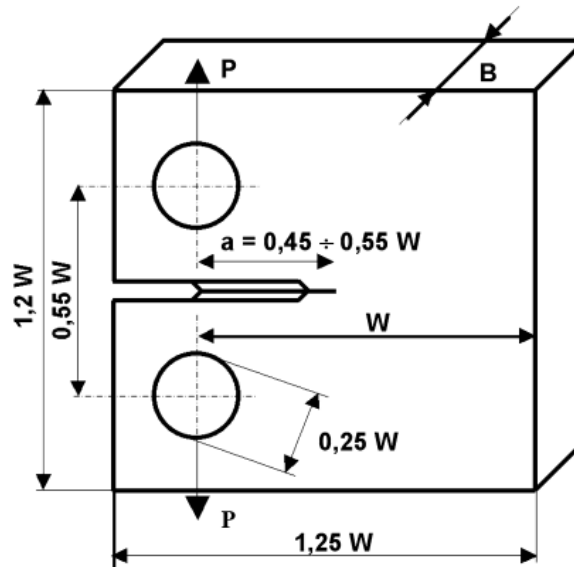
Durante el ensayo a fractura, ha de obtenerse un registro continuo de la carga, P , en función de la abertura de la entalla, V . La carga mínima que da lugar a una extensión significativa medible de la grieta (determinada a partir del diagrama carga-apertura de la entalla) se considera la carga crítica y el K_{IC} se calcula a partir de esta carga.

La validez del valor K_{IC} determinado ha de comprobarse a posteriori; el tamaño de probeta empleado debe ser superior a un tamaño mínimo función del K_{IC} del material y de su límite elástico; la validez de un ensayo no puede pues garantizarse de antemano, aun cuando se cumplan rigurosamente todas las instrucciones previas al ensayo contenidas en la Norma como son geometría de la probeta, agudeza, tamaño y orientación de la grieta, velocidad de carga, etc. Como se ve en la Figura 1, el valor nominal de la longitud de la grieta, a , es igual al espesor de las probetas, B , mitad de la anchura, W ($0,45$ a $0,55 W$, $B=0,5 W$). Los apoyos de la probeta de flexión están separados $S = 4W$ y la carga se aplica en el punto medio, en el lado opuesto a la entalla. El esfuerzo de carga y las reacciones en los apoyos se aplican a la probeta a través de rodillos cuyo diámetro ha de ser superior a $W/4$. La carga de la probeta de tracción

compacta se hace a través de pasadores, con mordazas de horquilla, que permiten la rotación de la probeta durante la carga.



Probeta para ensayo de flexión



Probeta compacta

Figura 1. *Probetas normalizadas de flexión en tres puntos (SEN3) y tracción compacta C(T) para los ensayos de determinación de la tenacidad de fractura K_{IC}*

Para probetas de igual sección, la utilización de la probeta de flexión supone la aplicación de una carga inferior en un 10% a la carga de tracción necesaria para alcanzar el mismo nivel del factor de intensidad de tensiones en la probeta compacta (o, alternatively, el espesor de la probeta de flexión puede ser un 7% superior al de la compacta de tracción a igualdad de carga aplicada, para obtener el mismo valor del factor de intensidad de tensiones). Sin embargo, la probeta de flexión requiere más de tres veces del material necesario para la de tracción, con el

consiguiente aumento de mecanizado de superficies planas; en contrapartida, la probeta, de tracción exige el mecanizado adicional de los dos agujeros de aplicación de la carga.

El error máximo previsible en la medida de K_I , tomando como base los niveles de precisión especificados en la Norma ASTM E 399 [7], es aproximadamente de un 2% para la probeta compacta de tracción y de un 2,5% para la probeta de flexión (para espesores de probetas a partir de 25 mm). Además de las probetas indicadas que son sin duda las más utilizadas, se contemplan en las diversas Normas que se han indicado otro tipo de probetas con formas diversas para secciones menos usuales. En la Figura 2 se presentan otras probetas que tienen forma de disco ó arco, que se utilizan en ocasiones para secciones de materiales con formas acabadas próximas a las probetas indicadas, como barras redondas, tubos, etc.

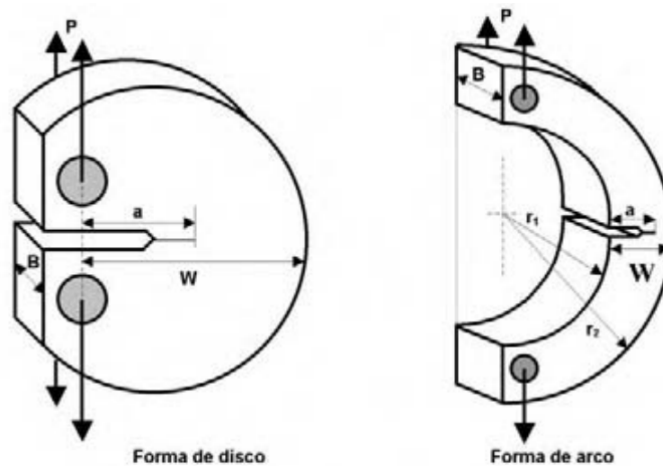


Figura 2. *Probetas tipo disco y tipo arco*

Las expresiones válidas [10] para el cálculo del factor de intensidad de tensiones de estas probetas en régimen elástico se deducen de las desarrolladas a partir de un análisis elástico lineal aplicado a la geometría específica de las probetas normalizadas y que son las siguientes:

Probeta de flexión

$$K_I = \frac{P}{B\sqrt{W}} \cdot \frac{3}{2} \frac{S}{W} \sqrt{\frac{a}{W}} \left[\frac{1,99 - \frac{a}{W} \left(1 - \frac{a}{W}\right) \left(2,15 - 3,93 \frac{a}{W} + 2,7 \frac{a^2}{W^2}\right)}{\left(1 + 2 \frac{a}{W}\right) \left(1 - \frac{a}{W}\right)^{3/2}} \right]$$

en general

$$K_I = \frac{P S}{B W^{1,5}} \cdot f_1\left(\frac{a}{W}\right)$$

con f_1 tabulada, donde si: $a = 0,5 W$; $f_1 = 2,66$

Probeta de tracción compacta

$$K_I = \frac{P}{B \sqrt{W}} \cdot \frac{2 + \frac{a}{W}}{\left(1 - \frac{a}{W}\right)^{3/2}} \left[0,886 + 4,64 \frac{a}{W} - 13,32 \frac{a^2}{W^2} + 14,72 \frac{a^3}{W^3} - 5,60 \frac{a^4}{W^4} \right]$$

y en general

$$K_I = \frac{P}{B W^{0,5}} \cdot f_2\left(\frac{a}{W}\right),$$

con f_2 tabulada, donde si: $a = 0,5 W$; $f_2 = 9,66$

2.2.2. Dimensiones de la probeta a ensayar

Como ya se ha considerado anteriormente el espesor de las probetas, B , y la longitud de la grieta, a , deben ser superiores, según la Norma, a $2,5 \cdot (K_{IC}/\sigma_{0,2})^2$, en que $\sigma_{0,2}$ es el límite elástico convencional para una deformación del 0,2%, medido a la misma temperatura y empleando la misma velocidad de carga que en el ensayo de fractura.

Puesto que el valor de K_{IC} no se conoce de antemano, debe estimarse previamente para elegir un espesor de probeta conveniente. La estimación debe hacerse en base a datos previos para un material similar, en base a extrapolaciones de medidas a otras temperaturas o velocidades o en base a correlaciones empíricas con otras medidas de la tenacidad. Si se carece de estos datos, la Norma recomienda unos espesores mínimos en función del valor de la relación del límite elástico al módulo elástico, $\sigma_{0,2}/E$, válidos para materiales estructurales de alta resistencia.

Para obtener una caracterización correcta de K_{IC} las dimensiones de la probeta se han elegido tales que los valores de K_I deducidos corresponden efectivamente al estado plano de deformaciones y representan adecuadamente el estado de tensiones en la

proximidad de la grieta bajo la hipótesis de un régimen estático lineal. La aproximación a un estado plano de deformaciones en una pieza agrietada en Modo I se realiza asintóticamente para espesores crecientes. Los valores del factor de intensidad de tensiones crítico aparente sólo resultan independientes del espesor del material a partir de un cierto valor mínimo de este.

La relación $(K_I/\sigma_{0,2})^2$ es proporcional al tamaño de la zona plástica que rodea el borde de la grieta, por lo tanto, equivale a especificar que, al alcanzarse las condiciones de propagación de la grieta, el espesor sea unas 50 veces mayor que el radio de la zona plástica en el estado de deformación plana.

2.2.3. Orientación del plano de agrietamiento

Es muy importante tener en cuenta el plano y la dirección de extensión de la grieta en relación con las direcciones características del producto, particularmente si se trata de productos laminados, forjados o fundidos que presentan importantes diferencias anisotrópicas. A tal efecto la Normalización actual contempla la identificación del plano de agrietamiento. Se utiliza una notación con guiones en los que las letras que preceden al guión representan la dirección perpendicular al plano de agrietamiento y las letras que siguen al guión representan la dirección prevista de la extensión de la grieta (véase la Figura 3).

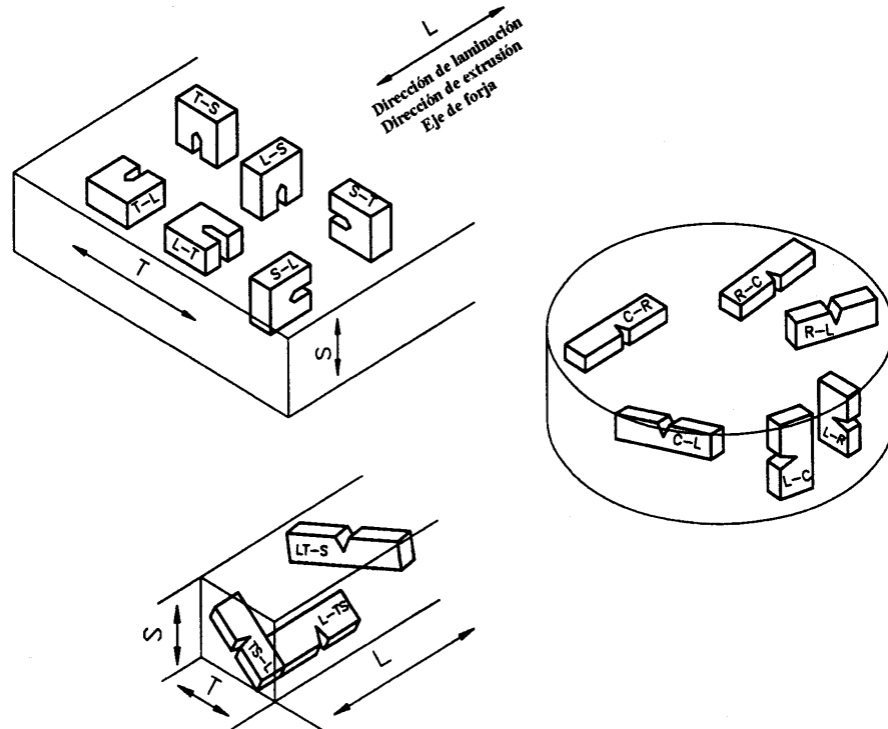


Figura 3. Denominación de las probetas según su orientación

2.2.4. Características exigidas a la grieta

Por grieta se entiende una discontinuidad plana limitada por un borde agudo. La grieta ideal está formada por las dos superficies planas (caras) que se unen a lo largo de una curva (frente de grieta) y se superponen cuando el sólido se encuentra libre de tensiones.

El modelo elástico lineal para los campos de tensiones y deformaciones en la proximidad de una grieta considera el límite de ésta como una singularidad, es decir, supone un radio de acuerdo cero en el borde de la grieta. Las entallas obtenidas por mecanizado, aun cuando los radios r de acuerdo obtenidos sean muy pequeños, no son asimilables a una grieta a los efectos de medidas del factor crítico de intensidad de tensiones y dan lugar a valores aparentes de, K_{IC} por exceso.

La introducción de una grieta aguda en una probeta se realiza habitualmente por fatiga. Esta permite la creación y propagación controladas de la grieta y es el método prescrito por las Normas. Para asegurar la posición de la grieta de fatiga, así como para poder desarrollarla con niveles de intensidad de tensiones bajos, las probetas se mecanizan con una entalla cuya forma más conveniente es la entalla terminada en V

(véase la Figura 4), pues evita la progresión de la grieta fuera del plano central de la probeta y favorece la propagación de la grieta con un frente aproximadamente normal a las caras externas, todo lo cual es también exigencia de la Norma.

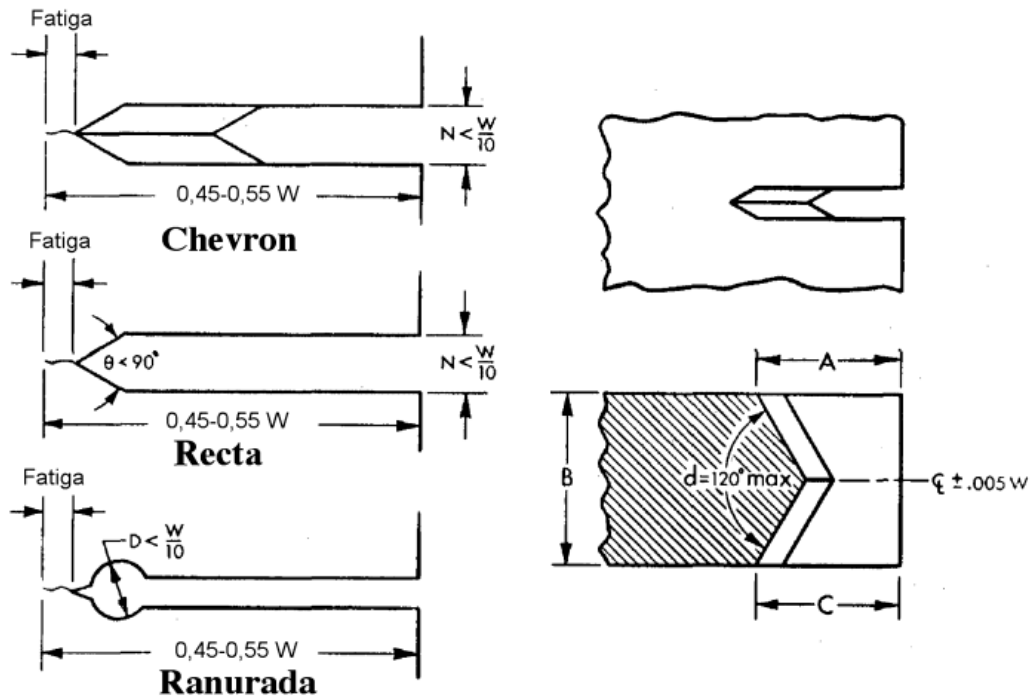


Figura 4. Geometrías de entallas. Figura extraída de [7].

La longitud de la grieta de fatiga a partir del punto máximo de penetración de la entalla mecanizada debe ser superior al cinco por ciento de la longitud total de grieta, ($\Delta a_f > 0,05 a$) y, en todo caso, debe ser superior a 1,3 mm. Con esta condición la Norma pretende minimizar la influencia de la geometría de la entalla en el estado de tensiones en el frente de la grieta, así como eliminar los posibles efectos locales que el mecanizado de la entalla hubiera producido en el material.

Durante el crecimiento por fatiga, la penetración de la grieta puede estimarse por las trazas en las caras de la probeta. La forma del frente y la longitud media real de la grieta sólo se pueden conocer, una vez realizado el ensayo.

Rota la probeta, la superficie de la grieta propagada por fatiga y la superficie de fractura final se distinguen claramente por su diferente topografía, como se puede ver en la Figura 4.5. La longitud de la grieta debe medirse, según la Norma, como la media de las longitudes en el centro de la probeta y en los dos puntos medios entre el centro y las caras de la probeta, como se aprecia en la Figura 4.6. El ensayo no se considera válido

si la diferencia entre dos cualesquiera de las tres medidas es mayor que un 5% del valor medio; así mismo, el ensayo es inválido si la longitud de la grieta en el punto de intersección con una cara externa es inferior al 90% de la media. Finalmente, ningún punto del borde de la grieta debe estar a menos de un 5% de la longitud media o a menos de 1,3 mm del borde de la entalla mecanizada. Por otra parte, la máxima desviación admitida de plano de la grieta respecto al plano medio de la probeta es de 10°.

Para obtener grietas agudas, se recomienda utilizar en el ensayo de fatiga los mínimos niveles de tensión aceptables desde un punto de vista práctico y la especificación más importante se refiere a que el factor de intensidad de tensiones, durante el ensayo de fatiga, no debe ser superior al 60% del K_{IC} , obtenido posteriormente. La agudeza de una grieta de fatiga, su radio de acuerdo aparente está relacionada con el tamaño de la zona plástica generada por el máximo nivel de tensión del ciclo utilizado en el ensayo de fatiga. A partir de un cierto nivel de intensidad de tensiones máximo, se obtienen posteriormente valores aparentes de K_{IC} crecientes.

La Norma establece que durante el crecimiento de grieta a fatiga del último 2,5% de la longitud final de la grieta la relación del factor de intensidad de tensiones máximo aplicado respecto del módulo de Young no debe sobrepasar el valor límite $K_{f\max}/E < 0,00032m^{1/2}$. En algunos casos, esta recomendación puede no ser suficientemente restrictiva, por lo que, parece oportuno insistir en la recomendación de que se utilice el mínimo nivel de tensiones compatible con un tiempo de crecimiento razonable. Esta recomendación es particularmente oportuna cuando el crecimiento de la grieta se realiza a temperatura ambiente y la determinación de K_{IC} se lleva a cabo a otra temperatura, especialmente si se trata de una temperatura inferior; en este caso, se debe evitar que el tamaño de la zona plástica en el punto máximo del ciclo de fatiga alcance un tamaño próximo al de la zona plástica al alcanzarse el K_{IC} a la nueva temperatura de ensayo (la Norma impone, que cuando el agrietamiento a fatiga se realice a una temperatura T_1 , diferente de la temperatura de ensayo T_2 , K_{\max} debe cumplir la condición:

$$K_{\max} < 0,6 K_Q \left(\frac{\sigma_{0,2\%T_1}}{\sigma_{0,2\%T_2}} \right)$$

donde $\sigma_{0,2T_1}$ y $\sigma_{0,2T_2}$ son los límites elásticos a las temperaturas T_1 y T_2 respectivamente.

2.2.5. Realización del ensayo de fractura

El ensayo debe llevarse a cabo dentro de unos márgenes de velocidad limitados para obtener una medida de K_{IC} en condiciones de carga estática. La Norma establece que la velocidad de aumento del factor de intensidad de tensiones debe estar comprendida entre $0,55$ y $2,75 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2} \cdot \text{s}^{-1}$.

De las ecuaciones del apartado 2.2.1 puede obtenerse el margen de velocidades de carga admisible para unas dimensiones concretas de probeta. Puede comprobarse que la velocidad de carga admisible para probetas de 25 mm de espesor se sitúa aproximadamente entre 300 y $1500 \text{ N} \cdot \text{s}^{-1}$ para la de flexión y entre 340 y $1700 \text{ N} \cdot \text{s}^{-1}$ para la probeta de tracción compacta.

Si la máquina de ensayos no dispone de control de carga y trabaja a velocidad de desplazamiento constante, la gama de velocidades admisibles para la validez del ensayo estático según ASTM E 399 puede obtenerse a partir de la expresión de la flexibilidad C , de la probeta. Para la probeta compacta de tracción con $a/W = 0,5$

$$C = \frac{u_p}{P} \cong \frac{33,64}{E B}$$

de donde se deduce que, para probeta de acero de espesor $B = 25 \text{ mm}$, la gama admisible de velocidades de desplazamiento se sitúa aproximadamente entre $2,3 \cdot 10^{-3}$ y $1,1 \cdot 10^{-2} \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$.

Durante el ensayo, es preceptivo registrar la carga, P , en función de la abertura de la grieta, v . Para ello es necesario colocar un extensómetro muy preciso en el mismo borde de la entalla o apoyado en cuchillas que se atornillan a la cara frontal de la probeta, como se presentan en la Figura 5. El extensómetro más simple consiste en dos bandas fijadas a una pieza separadora, trabajando a flexión, dotadas de cuatro galgas, una en cada cara, formando un puente completo. En la Figura 6 se puede apreciar el montaje completo para un ensayo de una probeta compacta.

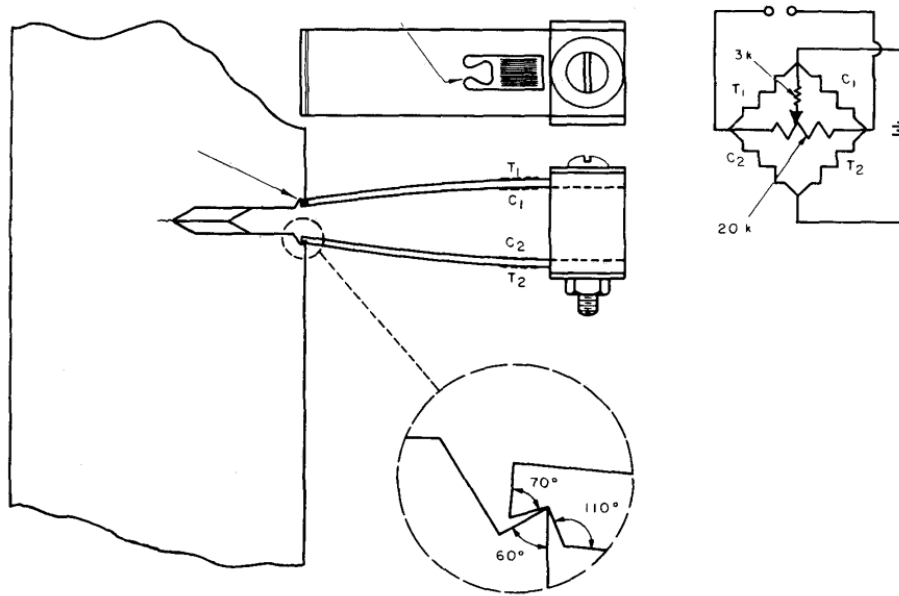


Figura 5. Extensómetro para medir la apertura de entalla

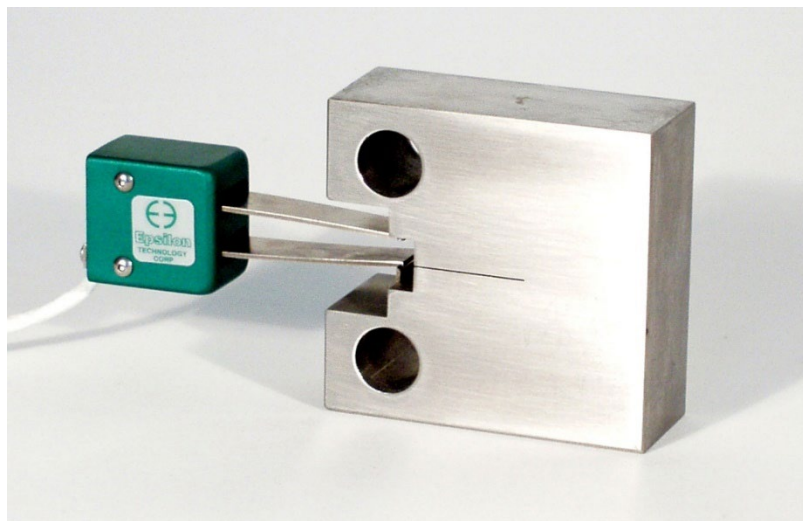


Figura 6. Montaje del extensómetro para un ensayo de una probeta compacta

Para obtener un buen registro de la curva P-v la Norma establece que la pendiente de la parte lineal de este registro debe estar entre 0,7 y 1,5, y son útiles las expresiones de la abertura de la grieta para las probetas normalizadas en régimen elástico por debajo de la carga crítica:

$$v = \frac{P}{E B} f\left(\frac{a}{W}\right)$$

Valores de la función $f(a/W)$ pueden encontrarse en las Normas que se han citado repetidamente para la probeta compacta de tracción y de flexión respectivamente. Estos valores se reproducen de forma gráfica en la Figura 7, para las probetas de flexión y compacta.

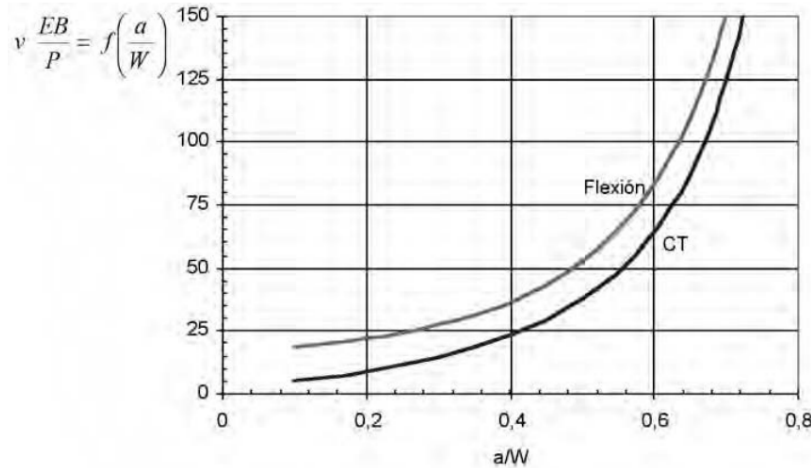


Figura 7. Soluciones adimensionales para la flexibilidad de las probetas de flexión y compacta

2.2.6. Cálculo e interpretación de los resultados

Se considera que se ha alcanzado el factor de intensidad de tensiones crítico cuando se alcanza un nivel de carga que produce una propagación significativa de la grieta. El diagrama $P-v$ puede tener varias formas como se muestra en la Figura 8. Inicialmente la apertura de grieta crece linealmente con la carga P .

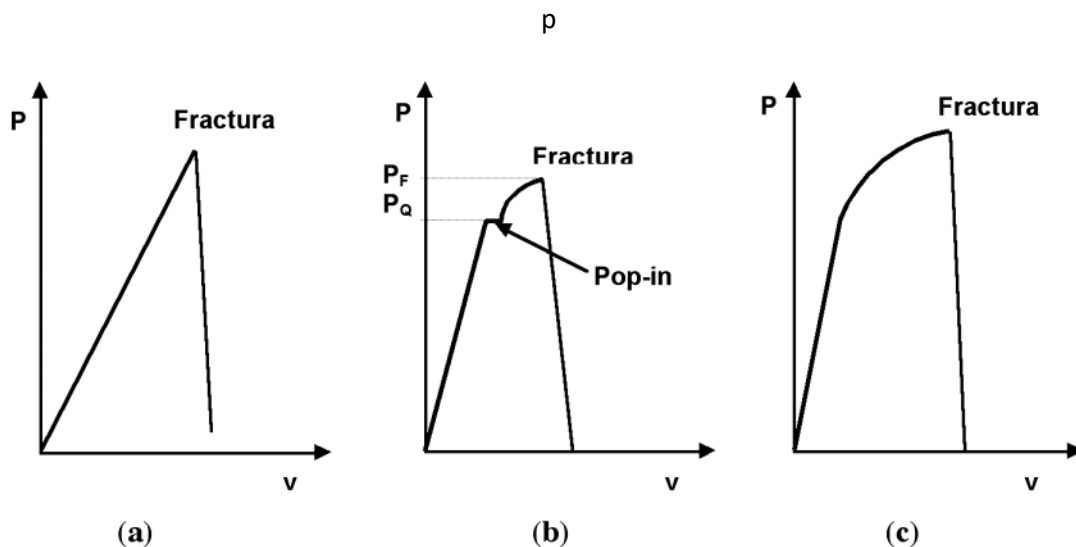


Figura 8. Diversos registros $P-v$

En el caso ideal, como se presenta en la Figura 8(a) de un régimen elástico lineal perfecto, la relación $P-v$ es lineal y, con la geometría y condiciones de carga de las probetas de tracción o flexión, al alcanzarse la carga crítica la propagación ocurriría de manera inestable.

En materiales metálicos reales, es inevitable la desviación, en algún grado, del comportamiento lineal y es frecuente que ocurra alguna propagación estable previa a la fractura inestable final. En muchos casos, se produce una propagación de la grieta en el momento de la carga P_Q . Esta propagación se asocia a menudo con un pequeño chasquido, perfectamente audible, que se denomina «pop-in» y se caracteriza en el gráfico por un pequeño escalón en este punto, como se ve en la Figura 8(b). El crecimiento de grieta se detiene, tanto porque se ha producido una caída de la carga como porque se produce un incremento de la resistencia de la grieta. Después del «pop-in» se puede aumentar la carga, hasta que se produce la fractura para la carga P_F . A veces se producen nuevos «pop-ins». En principio la carga del «pop-in» P_Q se debe utilizar para la evaluación de K_Q .

Los materiales con buena tenacidad presentan un incremento gradual no-lineal entre la carga y el desplazamiento, como se ve en la Figura 8(c). Esta no linealidad es el resultado de dos factores: deformación plástica y el gradual agrietamiento que precede a la fractura. Si esta no linealidad está causada por el crecimiento de grieta solamente, podemos encontrarnos con un tipo de diagrama como el del caso anterior Figura 8(b). Si la propagación estable con carga creciente es importante, es síntoma de que estamos lejos de las condiciones de deformación plana o próximos a las de deformación plástica generalizada y el ensayo debe rechazarse a los efectos de medida del K_{IC} . Pero para la determinación experimental de la carga crítica se ha de admitir la posibilidad de un cierto grado de no linealidad y, puesto que el punto crítico de propagación no queda inequívocamente definido como en el caso de un material elástico ideal, se tiene en cuenta un criterio convencional del punto de propagación de una grieta, que guarda semejanza con la definición del límite elástico convencional (0,2%) para materiales reales. Se define P_Q como la carga a la que se ha producido en torno a un 2% de extensión de grieta, para ello se acepta el criterio normalizado de que ha ocurrido una propagación «significativa» de la grieta cuando la relación P/v es un 5% inferior a la relación elástica lineal inicial del ensayo.

Parte de la desviación del comportamiento lineal durante la carga de las probetas corresponde precisamente al aumento del tamaño efectivo de la grieta, al ir aumentando

el tamaño de la zona plástica; puesto que para que un ensayo se acepte como válido ese tamaño no debe sobrepasar aproximadamente el 2% del tamaño inicial de la grieta, el criterio de propagación de la grieta, definido por el –5% de desviación de la recta P-v inicial, corresponde precisamente al criterio de asegurar que la grieta ha comenzado a propagarse realmente, para esa carga crítica convencional $P_{5\%}$.

Este criterio se puede demostrar sobre la base de un pop-in que se presenta en la Figura 9 en la que se produce un incremento de desplazamiento bajo una disminución de la carga. Suponemos que la carga P_P es la máxima carga que precede al pop-in y el desplazamiento v_i que es el desplazamiento asociado con la carga elástica de la probeta que contiene una grieta de longitud a_0 hasta la carga P_P y Δv_i representa el desplazamiento no-elástico antes del pop-in.

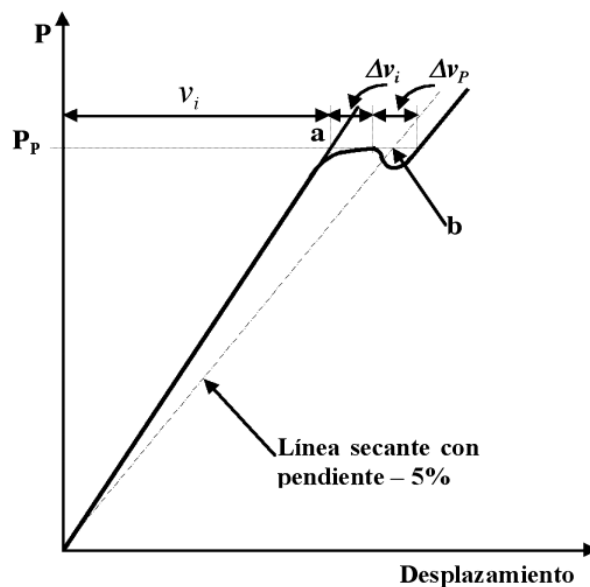


Figura 9. Construcción de la secante para una curva con pop-in

Si se produce una pequeña propagación de la grieta puede ser debido a los efectos de la plasticidad o a un cambio en el aumento de flexibilidad. Si Δv_i es debido a un aumento de la longitud de la grieta de magnitud Δa , se supone que Δa no debe exceder el valor previamente asociado con la región del campo K:

$$\frac{\Delta a}{a_0} \leq 0,02$$

Para convertir esta ecuación en un criterio de desplazamiento, tenemos que usar las curvas de flexibilidad con respecto al desplazamiento determinadas experimentalmente

que relacionan la carga P con el desplazamiento v en función del tamaño relativo de grieta (a/W). De la expresión 4.4 tenemos:

$$v \frac{EB}{P} = f\left(\frac{a}{W}\right)$$

Para carga constante tenemos:

$$\frac{\Delta v}{v} = \frac{\Delta v \frac{EB}{P}}{v \frac{EB}{P}} = \frac{f\left(\frac{a}{W} + \frac{\Delta a}{W}\right) - f\left(\frac{a}{W}\right)}{f\left(\frac{a}{W}\right)}$$

Como $\Delta a \ll a_0$ (recordemos la condición que $\Delta a = 0,02 a_0$), podemos escribir:

$$\frac{\Delta v_i}{v_i} = \frac{1}{f} \frac{df}{d(a_0/W)} \left(\frac{\Delta a_0}{W}\right) = \frac{1}{f} \frac{df}{d(a_0/W)} \cdot \frac{\Delta a_0}{a_0} \cdot \frac{a_0}{W}$$

Si hacemos: $H = \frac{a_0}{W} \cdot \frac{1}{f} \cdot \frac{df}{d(a_0/W)}$, tenemos:

$$\frac{\Delta v_i}{v_i} = H \cdot \frac{\Delta a_0}{a_0}$$

Resultando H como un factor de calibración experimental a partir de las curvas carga desplazamiento en función de $(\Delta a_0/W)$ tenemos que:

$$\frac{\Delta v_i}{v_i} \leq 0,02 H$$

La limitación en la desviación de la linealidad puede expresarse en términos de la pendiente de la secante a partir del origen hasta la carga máxima P_P , según está trazada en la Figura 9 como el desplazamiento de este punto es P_P es $v_i + \Delta v_i$ tenemos:

$$\frac{v_i + \Delta v_i}{P_P} \leq \frac{v_i}{P_P} [1 + 0,02 H]$$

Para el rango de valores recomendados de a_0/W , que varían entre 0,45 a 0,55, encontramos que $0,02 H$ resulta ser 0,05 para la probeta de flexión como se presenta

en la Figura 10. Una vez realizado el ensayo y obtenido el diagrama P-v, se traza la secante dependiente veces de la pendiente de la zona lineal del inicio, desde el origen de coordenadas. La intersección con la curva P-v determina la carga $P_{5\%}$.

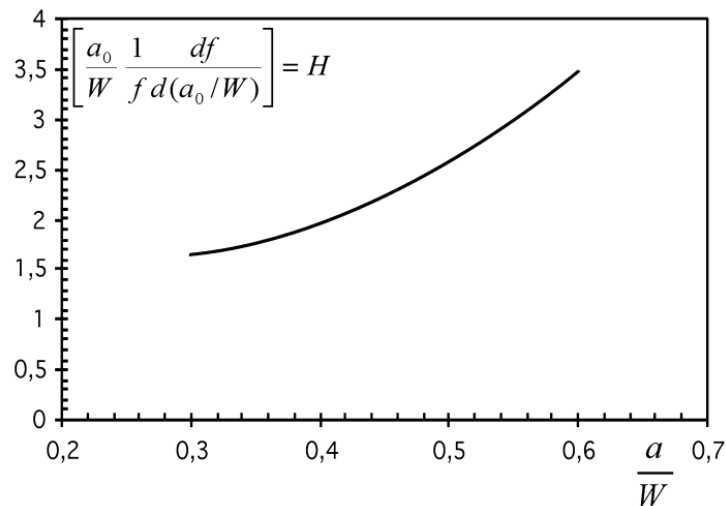


Figura 10. Variación del factor de calibración H para la probeta de flexión

Las curvas P-v se ajustan a alguno de los tres tipos que contemplan las Normas ASTM o Europeas, representadas en la Figura 11. Si $P_{5\%}$ es superior a cualquier valor previo de la carga (caso I) se tomará $P_{5\%}$ como valor condicional de la carga crítica. Si existe un máximo de carga previo $P_{5\%}$ (casos II y III) se toma éste como P_Q . El caso III corresponde a la propagación inestable frágil de un material real y el caso I, a la fractura de un material dúctil y tenaz que admite propagación estable apreciable antes de alcanzar el punto crítico inestable. En el caso II, intermedio, ocurre un comienzo de propagación con «pop-in» que se continúa por un crecimiento estable antes de la fractura final. Para un mismo material, espesores crecientes conducen a un desplazamiento de las curvas del tipo I al tipo III, conforme se aproximan las condiciones de deformación plana. Como ya se ha citado, una propagación estable importante es síntoma de que las condiciones del ensayo están lejos de los supuestos de la mecánica lineal de la fractura en condiciones de deformación plana. La Norma establece como criterio de validez del ensayo que la relación entre la carga máxima P_{\max} , y la carga crítica condicional, P_Q no sobrepase la relación 1,1. Si esta condición no se cumple, el ensayo es rechazable a los efectos de determinación de K_{IC} . En caso contrario se procede a la determinación de un factor crítico de intensidad de tensiones condicional, K_Q introduciendo P_Q en las ecuaciones indicadas en el apartado 2.2.1.

Si el valor de K_Q cumple las condiciones de espesor establecidas para el tamaño máximo de la zona plástica, el valor condicional K_Q se acepta definitivamente como K_{IC} válido del material. Si el ensayo es inválido por excesiva propagación estable o por excesiva zona plástica, lo que procede, a efectos de caracterizar un material para la medida de la tenacidad a fractura es iniciar una nueva serie de ensayos con probetas de espesor más grande; se recomienda ensayar espesores al menos 1,5 veces mayores que el espesor previo inaceptable.

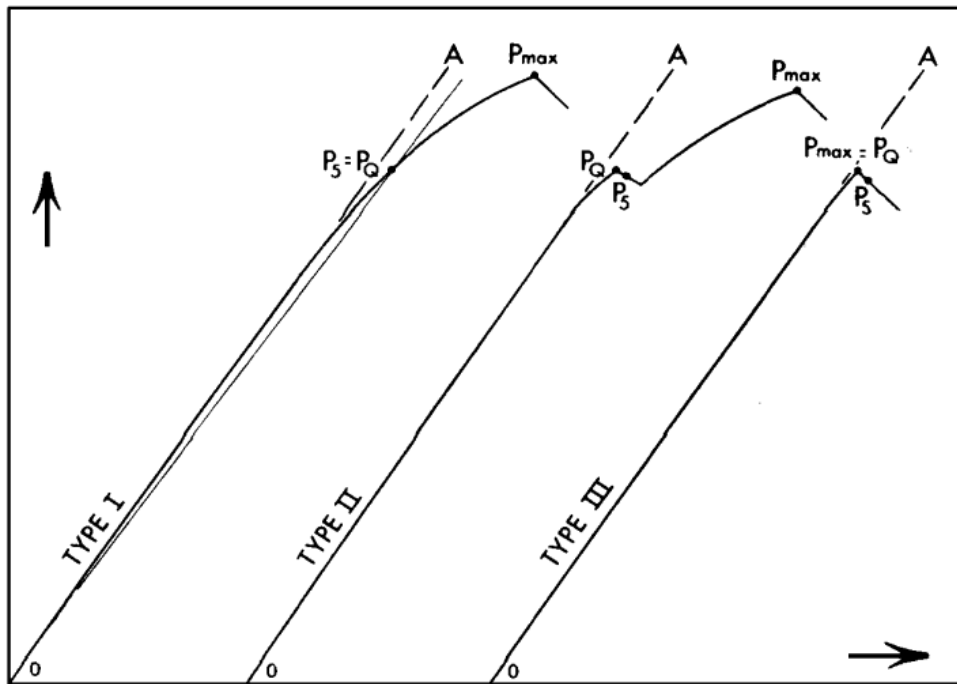


Figura 11. Diferentes tipos de curvas de carga-desplazamiento

2.3. CARACTERIZACIÓN EN FRACTURA OPTIMIZANDO EL MATERIAL

Poder realizar una evaluación de la vida de los componentes estructurales, así como de la probabilidad de fallo en servicio, es fundamental para cualquier tipo de instalación, componente o estructura a la hora de verificar su integridad estructural y vida remanente.

Esta verificación de su integridad estructural es un requisito indispensable para las plantas de generación de energía al estar sometidos, algunos de sus componentes más críticos, a temperaturas elevadas, tiempos de operación largos e incluso a radiación neutrónica, como es el caso de las vasijas de reactores nucleares, factores todos ellos que modifican las propiedades mecánicas de los materiales. Este es un problema que, como ya se comentado anteriormente, ocurre tanto para las centrales nucleares en operación, como para los futuros reactores de nueva generación, prototipos futuros y reactores de fusión.

Con las perspectivas de extensión de vida de muchas plantas nucleares que en la actualidad se encuentran en las últimas etapas de su vida para las que fueron diseñadas, se impone la necesidad de desarrollar técnicas de ensayo capaces de utilizar cantidades muy reducidas de material. Una de las vías actuales para resolver este problema, en base a la reutilización del material irradiado de las cápsulas de monitorización, es la miniaturización.

El material de partida, son los restos de probetas irradiadas ya ensayadas, de las cuales han de mecanizarse probetas completas a partir de las zonas que no hayan sufrido deformaciones plásticas. El resultado puede ser una serie de metodologías alternativas diversas, destacando probetas reconstruidas y probetas con dimensiones mucho más reducidas.

2.3.1. *Probetas reconstruidas*

El objetivo de esta técnica es reconstruir probetas a partir de las probetas ya ensayadas (normalmente pertenecientes a los Programas de Vigilancia de plantas nucleares). Una vez reconstruidas, se confeccionan nuevas Cápsulas de Vigilancia que son insertadas nuevamente en el reactor. La reconstrucción suele ser a partir de probetas Charpy ya ensayadas, las cuales se mecanizarán para obtener o nuevas probetas Charpy, como se detalla en la Figura 12 o probetas compactas, ambas con diferentes orientaciones.

La reconstrucción de probetas tiene la ventaja de que las nuevas probetas obtenidas tienen dimensiones standard por lo que no es necesario desarrollar nueva metodología de ensayo, sin embargo, el número de probetas que se pueden reconstruir es limitado.

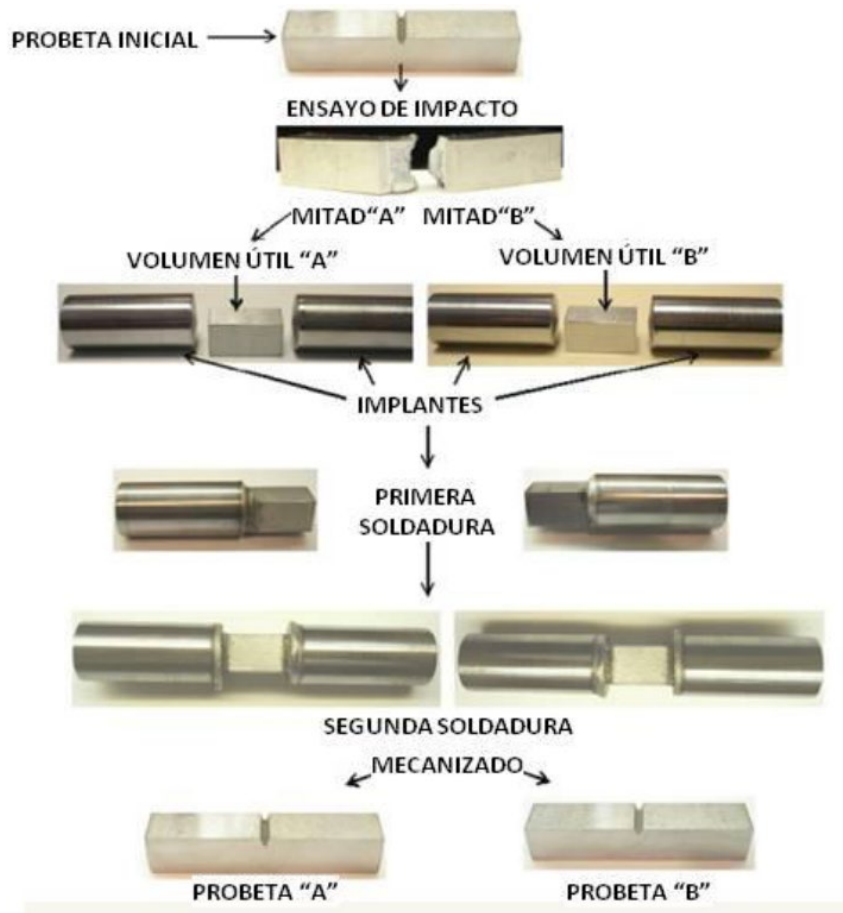


Figura 12. Reconstrucción de probetas Charpy a partir de una probeta Charpy ensayada [11].

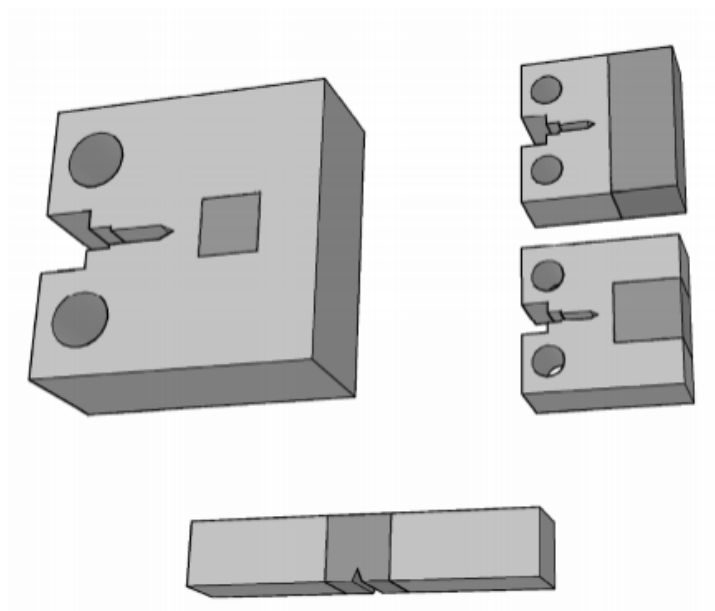


Figura 13. Reconstrucción de probetas CT a partir de probetas Charpy ensayadas [12]

2.3.2. *Probetas miniatura*

Otro enfoque, radicalmente diferente al anterior pero que persigue el mismo fin, la minimización de material disponible para la caracterización, consiste en obtener probetas lo suficientemente pequeñas.

Esto tiene una serie de ventajas como es el poder disponer de un elevado número de probetas disponible del mismo material; la dosis de radiación se disminuye al disminuir el volumen de las probetas; se obtiene una mejor representatividad estadística. Si bien tiene ciertos inconvenientes, puesto que hay que desarrollar nuevas metodologías de ensayo, pues las nuevas probetas quedan fuera de norma; el manejo o manipulación de las muestras se dificulta.

La bibliografía científica existente al respecto destaca las probetas miniatura no-estandarizadas [13], como un modo factible para la caracterización mecánica en servicio de los diferentes componentes de un reactor nuclear, siempre y cuando, los valores obtenidos sean comparables a los obtenidos por medio de métodos de ensayo y probetas normalizadas, y cuando se desarrollen técnicas de análisis que permitan correlacionar resultados de probetas de distintos tamaños.

En las últimas décadas, la vía de la miniaturización ha adquirido una gran importancia. El desarrollo de nuevas técnicas de ensayo capaces de utilizar cantidades mínimas de material ha servido para que la miniaturización de probetas sea hoy en día una de las líneas en las que más se investiga y avanza, tanto en el mundo nuclear como en otros campos de la ingeniería. Estas técnicas proporcionan una gran versatilidad en cuanto a condiciones de ensayo, a la vez que maximizan la información y minimizan el volumen. En este contexto, entre algunas otras metodologías, pueden ser destacadas las dos que gozan de mayores cotas de desarrollo y respaldo bibliográfico en la actualidad: el empleo de probetas Mini-CT (objeto del presente TFM) [2] [13] y la técnica de ensayo Small Punch Test (SPT) [14].

A continuación, se detallan algunas de las técnicas alternativas para la estimación de las propiedades más empleadas en diseño mecánico o en análisis convencionales de integridad estructural, como son las propiedades de tracción y de tenacidad a fractura de materiales metálicos.

Los ensayos miniatura se rigen en general por los mismos principios y procedimientos que los ensayos convencionales si bien la reproducibilidad de los ensayos es más crítica que en la caracterización convencional y han de tenerse

en cuenta una serie de factores, siendo claves para los materiales metálicos que el espesor de probeta debe ser tal que contenga un número mínimo representativo de granos constituyentes de material; la preparación de las probetas debe hacerse con sumo cuidado, evitando someter a la probeta a algún tipo de deformación permanente y teniendo en cuenta que cualquier imperfección superficial puede jugar un papel decisivo en la rotura de la muestra durante el ensayo. Asimismo, resulta complicado colocar extensómetros convencionales para el control de los alargamientos y las deformaciones. Estos ensayos pueden ser aplicados tanto a caracterizaciones en tracción como en fractura (Figura 14 y Figura 15). Sus procedimientos de ensayo, si bien tienen las características especiales citadas, siguen, en esencia, los mismos principios clave que los empleados en las probetas de dimensiones convencionales.

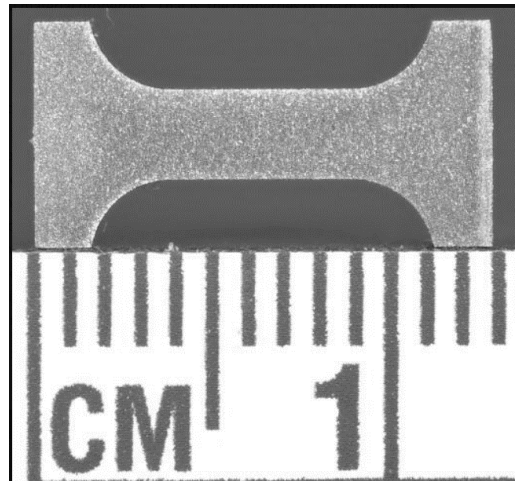


Figura 14. *Probeta de tracción miniatura* [15]

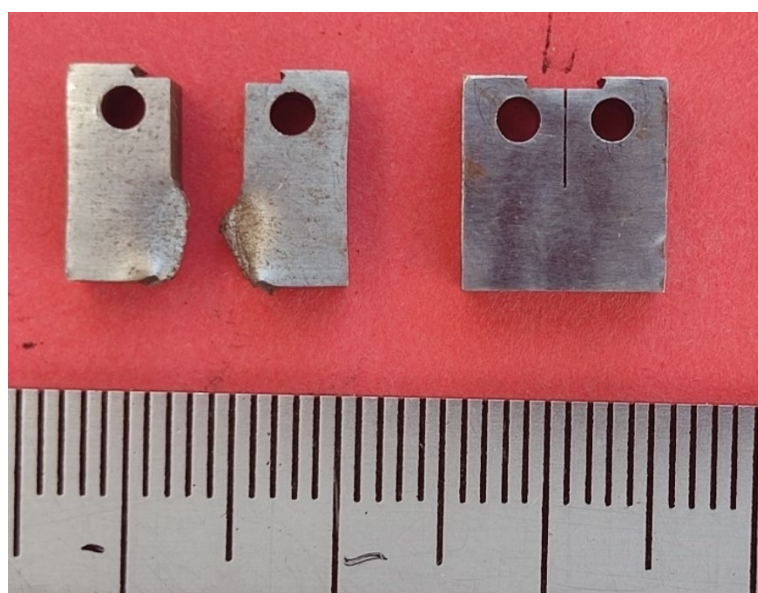


Figura 15. *Probetas mini-CT 0,16T C(T)*

El ensayo Small Punch (SPT) consiste básicamente en punzonar una probeta plana de pequeñas dimensiones, deformándola hasta rotura. Durante el ensayo se registran la fuerza ejercida por el punzón y el desplazamiento que sufre la probeta en su punto central. A partir de estos datos, se obtienen estimaciones de la resistencia a tracción o el valor de la tenacidad a fractura del material. Su interés radica en su capacidad para poder estimar las propiedades mecánicas de materiales metálicos con cantidades muy pequeñas de material (en forma de láminas finas de material) llegando a constituir en ocasiones una de las pocas alternativas viables a las estimaciones indirectas. Ha sido aplicado con éxito para la estimación de las propiedades en tracción y en fractura (mediante el uso de probetas modificadas); también es común su empleo en condiciones de fluencia, y más recientemente en escenarios ambientales adversos.

La técnica Small Punch permite la posibilidad de realizar una evaluación mecánica de materiales irradiados, con una menor exposición a la radiación del personal y la maquinaria involucrada en el proceso; el re-ensayo de probetas empleadas en los programas de vigilancia de centrales nucleares, las cuales podrían ser introducidas de nuevo al reactor, y re-evaluadas por técnicas SPT con posterioridad y en general, cualquier situación de escasez de material donde no sea posible la obtención de probetas acordes a los estándares convencionales.

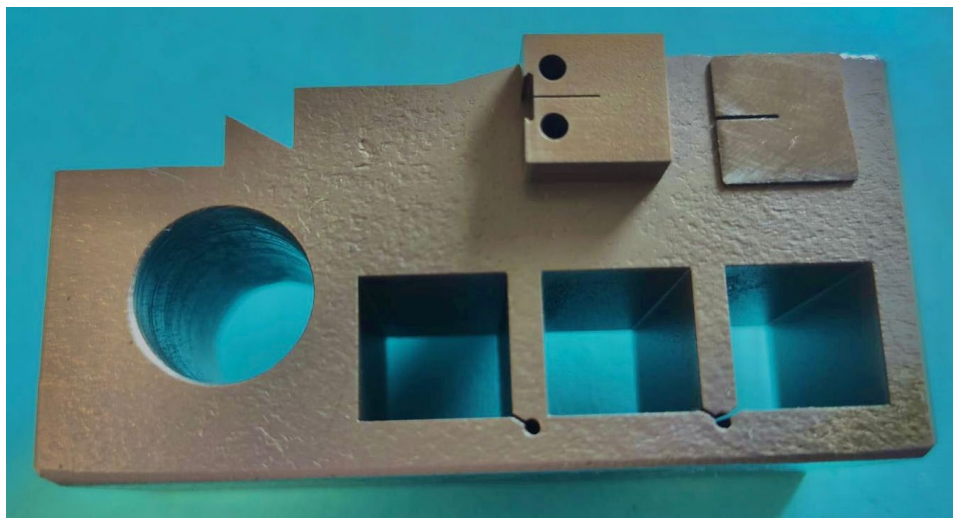


Figura 16. *Probetas miniatura (Mini-CT y probeta Small Punch) de fractura frente a probeta C(T) convencional.*

2.4. PROBETAS MINI-CT y tratamiento en la normativa

Las ventajas de las probetas miniatura de fractura, en adelante mini-CT ó 0.16T C(T), frente a las citadas SPT radican en que permiten la obtención directa de parámetros de fractura mediante un ensayo en todo análogo a los recogidos en la normativa, mientras que la técnica SPT lleva a cabo una estimación a partir de un punzonado. Es decir, mientras que el ensayo de mini-CT's mecánicamente reproduce los mecanismos de un ensayo normalizado de fractura, la técnica SPT tiene una sollicitación tensional radicalmente diferente. Por ello, el estudio de la mecánica de la fractura mediante mini-CT goza de gran interés, y debe ahondarse en todos aquellos aspectos particulares en su ensayo: objetivo de este proyecto.

Como se ha comentado en el apartado 2.1 la evaluación de la tenacidad a fractura con el uso de probetas miniatura C(T) extraídas de probetas Charpy irradiadas fue desarrollada y llevada a cabo, por primera vez en 2006 [6].

De igual manera, diversos estudios japoneses [1] [13] posteriores han demostrado que el enfoque de la curva maestra para la evaluación de la tenacidad a fractura se presenta como una herramienta poderosa para garantizar la fiabilidad de los aceros de vasija (RPV) usados en operación a plazo. Para obtener un número suficiente de datos para el enfoque de la curva maestra coexistente con el actual programa de vigilancia de las RPV, la utilización de especímenes en miniatura, que se pueden tomar de mitades rotas de especímenes de Charpy de vigilancia, es vital. La técnica de prueba para las probetas miniatura C(T) (Mini-CT) más extendida habitualmente [13] emplea probetas similares a las C(T) normalizadas, pero cuyas dimensiones son 4 x 10 x 10 mm, es decir un espesor de 0.16 pulgadas, habiéndose verificado la aplicabilidad básica del enfoque de la Curva Maestra en los aceros ferríticos de vasija más típicos.

En base a todo ello, se ha verificado que la tenacidad después de la corrección de espesor (también recogida en la normativa ASTM E-1921 [16]) es comparable al obtenido con probetas de espesores habituales (entornos de 1T).

La norma ASTM (E1921-10e1) [16] para la evaluación según la curva maestra, no limita el tamaño de muestra disponible, por lo tanto, las muestras Mini-CT pueden ser utilizadas de igual manera que las estandarizadas. Si embargo, el tamaño de 0.16T (4mm) de espesor de las probetas elegido radica en condiciones de conveniencia para la obtención del mayor número de probetas de mayor tamaño posible a partir de las mitades de las probetas obtenidas tras los ensayos de los programas de vigilancia. No

obstante, como se tratará más adelante, el hecho de emplear espesores tan reducidos hace que las condiciones de deformación plana no puedan ser satisfechas, cuestión que influenciará el citado tratamiento estadístico según los preceptos de la Curva Patrón.

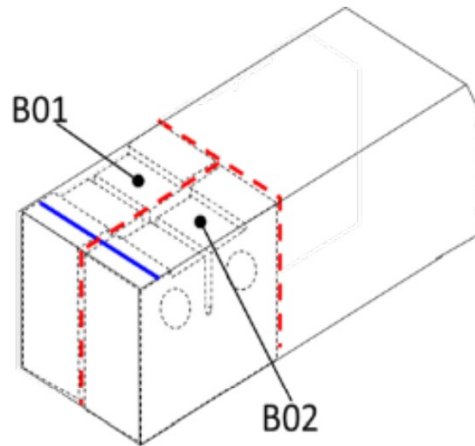


Figura 17. Extracción de probetas mini-CT a partir de probeta Charpy ensayada.

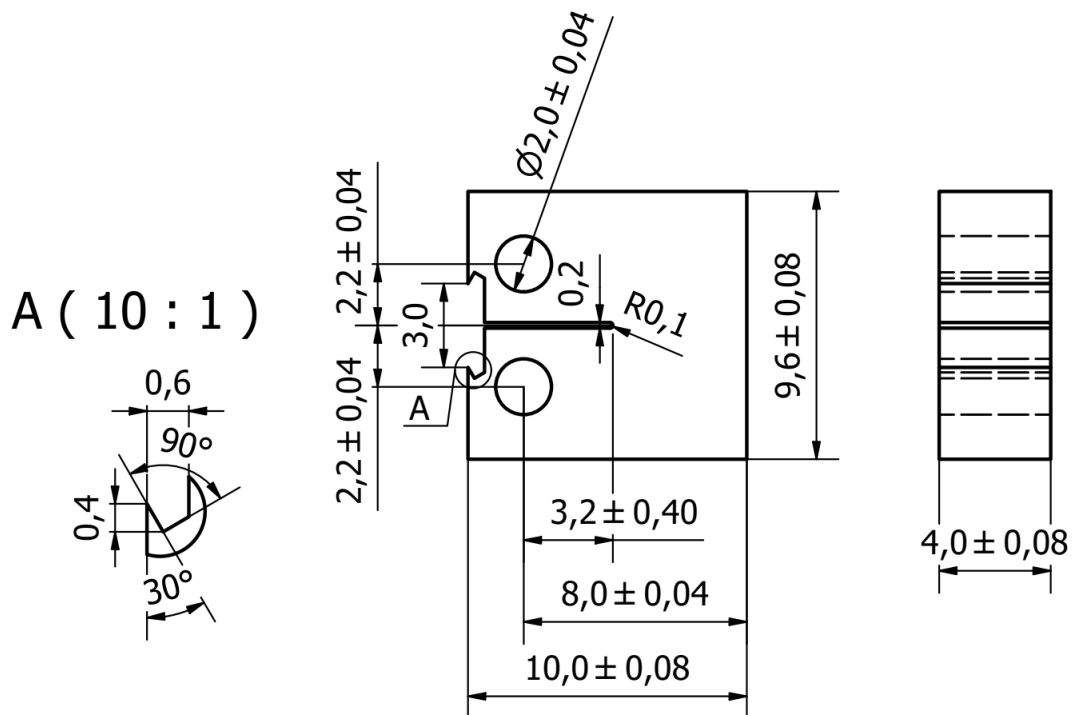


Figura 18. Plano de probetas 0,16T C(T) de acuerdo a ASTM E1921.

3. PROPUESTA EXPERIMENTAL 0.16C(T)

Para la caracterización de la tenacidad a fractura de materiales metálicos mediante el uso de probetas 0.16T C(T), el trabajo incluye la prefisuración de las probetas, los ensayos de mecánica de fractura según ASTM E1820 [3] y ASTM E1921 [4], la evaluación de la temperatura de referencia T_0 según el concepto Master-Curve (ASTM E1921 [4]) siguiendo los métodos de temperatura única o multi-temperatura, y la determinación de la curva JR en régimen dúctil en algunos casos.

En esta sección, se analizan las consideraciones sobre los principales problemas relacionados con los ensayos de fractura en probetas de 0,16 CT para adecuarse a la normativa vigente, tal como ASTM E-1820 [3] y ASTM E-1921 [4] y el diseño de las diferentes posibilidades de geometría de probeta. Para finalmente llegar al diseño del dispositivo de ensayos, fin último de este trabajo.

3.1. GEOMETRIAS DE LA PROBETA MINI-CT Y RANURADO LATERAL

Se emplearán probetas de 0,16 C (T) de $B = 4$ mm de espesor (Mini-CT) (luego $W = 2B = 8$ mm). La geometría de las probetas Mini-CT (Figura 1) debe seguir las especificaciones de ASTM E-1921-10E1 [9]. Como se indica en la literatura [10], la geometría antes mencionada diferirá de los requisitos de ASTM E-1921 [4] en el ancho de la entalla mecanizada, que debe ser de $0,01 W$ (0,08 mm). Esta dimensión es muy difícil de cumplir debido a la limitación en el diámetro de hilo mínimo disponible utilizado en el mecanizado de entallas ($\sim 0,1$ mm), lo que hace que el ancho de las ranuras oscile entre 0,15 mm y 0,2 mm en la práctica. En esto radica la principal diferencia respecto a

las probetas C(T) de dimensiones estándar, hecho que una vez la fisura mecánica ha comenzado no debería tener una influencia decisiva, pero que será evaluada en los análisis subsiguientes de proyecto FRACTESUS [2], en el que se aplicarán los desarrollos del presente TFM.

Es de común aplicación en las probetas de fractura de dimensiones convencionales la técnica del ranurado lateral, que básicamente consiste en el fresado de dos ranuras con forma de chevrón a cada lado del 10% del espesor de probeta [16], definiendo el plano por donde debería tener lugar la propagación de grieta. Las virtudes de esta técnica radican en otorgar mayor confinamiento al fondo de grieta y ayudar a una propagación más recta por el plano medio de la probeta. Sin embargo, su empleo no es habitual en las probetas mini-CT ya que el espesor de 4mm ya es tan pequeño que esto sólo incrementaría más aún las condiciones de tensión plana. Así, en la propuesta experimental no se utilizarán entallas laterales en los ensayos. La Figura 12 presenta la opción de probeta 0,16 C(T) que se empleará. Como puede verse la figura incluye las dimensiones y el acabado de la superficie, el cual tiene cierta importancia dado lo reducido de las dimensiones

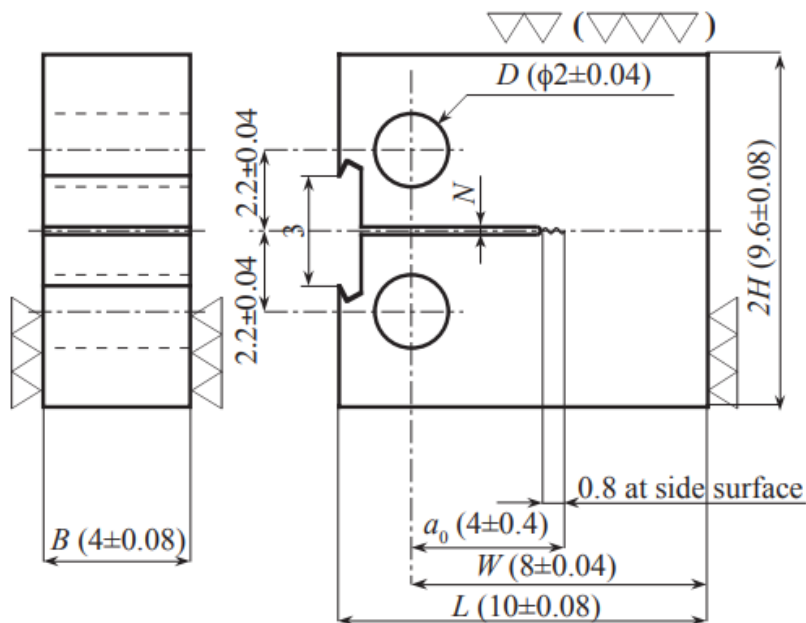


Figura 19. Ejemplo de *geometría* de una probeta de 0,16 C (T) a emplear (tomado de [10]).

La longitud de la entalla resultante de la entalla mecanizada por electroerosión por hilo (wire cutting) debe ser cercana a 3,0 mm, con una prefisuración por fatiga recomendada posterior entre 3,6 mm y 4,4 mm, lo que lleva a una longitud final de la fisura previa

objetivo de $0,5 W \pm 0,05 W$ en cualquier caso debe cumplir con las limitaciones de ASTM E-1921 [4]. La longitud de la fisura será controlada por las expresiones recogidas en los estándares antes mencionados a partir de los valores de amplitud de carga y desplazamiento de apertura de fondo de fisura (CMOD), o desplazamiento de línea de carga, medidos en tiempo real. Una vez finalizado el ensayo, se verificará la longitud de la fisura inicial real y, si es necesario, se corregirá midiendo la longitud de la fisura en 9 puntos de la superficie de la fractura, como se indica en ASTM E-1921 [4]. Los datos de desplazamiento de la línea de carga se obtendrán y registrarán durante el ensayo.

Si bien la propuesta experimental presentada aglutina los rasgos más habituales entre los diversos grupos de trabajos a nivel mundial en el campo de las probetas mini-CT de 4mm espesor, existen algunas ligeras variaciones que dan lugar a probetas que, siendo equivalentes en esencia, presentan ciertas particularidades en una o varias de sus dimensiones tal como recoge la tabla siguiente. Estas propuestas no cumplen estrictamente con las especificaciones estándar vigentes, pero son una opción real y debe dejarse abierta la puerta a su análisis, ya que pueden proporcionar información importante, ya que de lo contrario puede suceder que se descarten valiosos resultados de ensayos. Todos estos efectos se investigarán para proporcionar las especificaciones más adecuadas en el proyecto FRACTESUS [2].

Laboratory	W [mm]	Wtot [mm]	a0 [mm]	B [mm]	H [mm]	H* [mm]	ΔFF [mm]	ΔLL [mm]
CCFE	8	10	3	4	9.6	2.2	1.5	4.5
CEA	8	10	2.4	4	9.6	2.2	1	-
CIEMAT	8	10	3.2	4	9.6	2.2	-	4.3
CRIEPI	8	10	3	4	9.6	2.2	1.5	-
FRA-G	8	10	2.7	4	9.6	2.2	1.25	-
HZDR	8	10	3	4	9.6	2.2	1.5	-
KIT	8	11.5	2.5	4	9.6	2.2	2	-
MTA-EK	8	10	3.2	4	9.6	2.75	1	4.5
NRG	8	10	3.2	4	9.6	2.2	-	4.5
NRI	8	10	3	4	9.6	2.2	1.5	-
PSI	9	11.25	2.5	4.5	10.8	2.475	-	-
SCK CEN	8.3	10	2.7	4.2	10	2.3	-	4.5
UC	8	10	3.2	4	9.6	2.2	1.5	-
UoB	8	10	3.2	4	9.6	2.75	-	4.5
VTT CNS	8	10	3.2	4	9.6	2.75	-	4.5
VTT RH1	8	10	3.2	4	9.6	2.2	1	4.5

Tabla 1. Dimensiones de las probetas de los diferentes laboratorios participantes en el proyecto FRACTESUS [17]

3.2. PROPUESTA DE GEOMETRÍA DE PROBETA Y PREPARACION

3.2.1. Geometría de probeta Mini-CT empleada

Para los trabajos de puesta a punto de un sistema experimental recogidos en el presente TFM se ha decidido también llevar a cabo la extracción de probetas reales previamente ensayadas. Para ello se ha planteado la obtención de probetas mini-CT a partir de dos situaciones: probetas C(T) de B=25mm de espesor de acero ferrítico-perlítico laminado habitual de construcción metálica de grado S275, y probetas SEN-B de B=15mm de espesor de otro acero ferrítico-perlítico laminado de grado S460. Estas probetas habían sido ensayadas para determinar la tenacidad a fractura de dichos aceros, por lo que los datos obtenidos de los ensayos miniatura se podrán contrastar con los obtenidos mediante ensayo convencionales, lo que permite una de las premisas pretendidas por los ensayos miniatura: re-ensayar materiales.

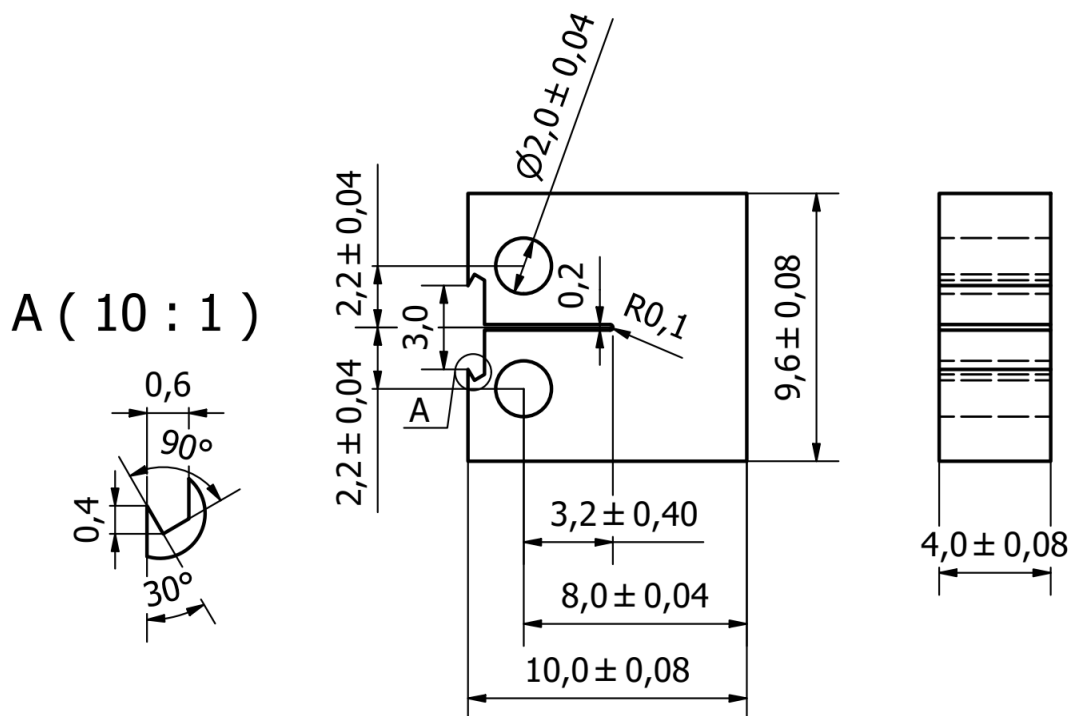


Figura 20. Plano de probetas 0,16T C(T) de acuerdo a ASTM E1921.

A partir de las mitades rotas (Figura 21 a Figura 24) se mecanizaron por medio de electroerosión por hilo las probetas mini-CT, Figura 20, siguiendo las especificaciones en ASTM E1921-10e1 [16] con la excepción del ancho de la entalla central

anteriormente mencionado. Debido a la limitación en el hilo utilizado en el mecanizado de hendiduras disponible de diámetro mínimo 0,1 mm, el ancho de entalla se convirtió en alrededor de 0,2 mm en lugar de 0,01 W (que sería 0,08 mm en Mini-CT según ASTM E1921-10e1 [16]); esta característica habitual en el mecanizado de las probetas Mini-CT lo recoge la literatura [13] [18].

En la Figura 21 y Figura 23 se puede ver la disposición de las probetas mini C(T) extraídas a partir de una mitad de probeta C(T) de 25mm de espesor. En primer lugar, se extrajeron tres bloques, y de cada uno de ellos cuatro probetas Mini-CT, poniendo especial atención en la orientación de la entalla el mismo plano que la probeta primigenia. Este hecho es fundamental para reproducir las condiciones de propagación de grieta en la sub-probeta en la misma orientación que la probeta estándar.

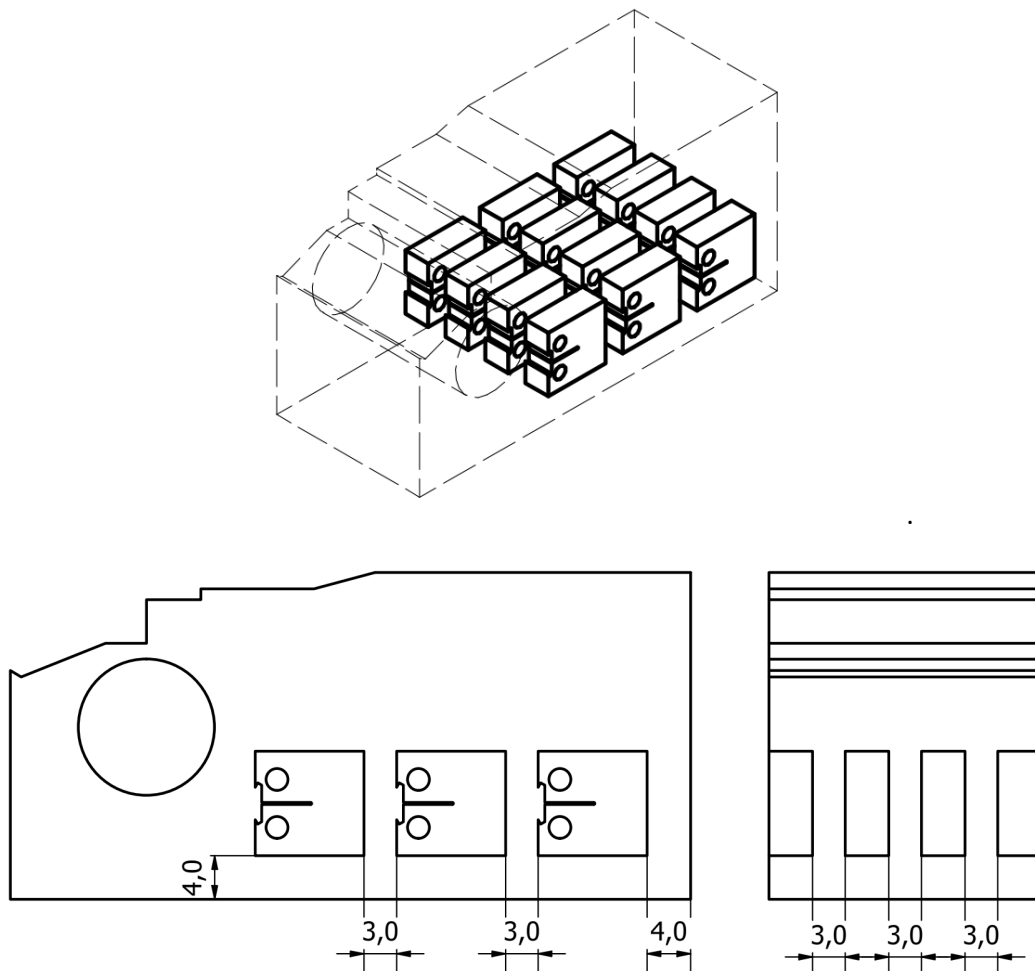


Figura 21. Plano de extracción de las probetas 0,16 C(T) a partir de probetas C(T) ensayadas de acero S275

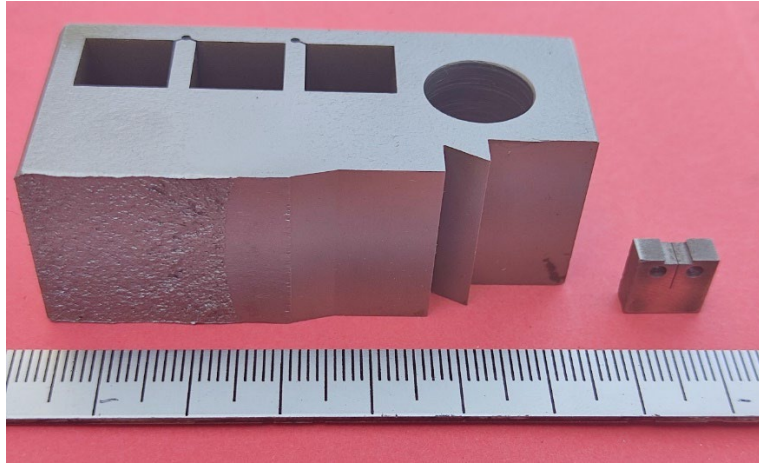


Figura 22. *Probeta 0,16 C(T) extraída a partir de probeta C(T) ensayada de acero S275*

De igual forma en la Figura 23 y Figura 24 se muestra la disposición de las probetas mini C(T) extraídas a partir de una mitad de probeta SEN-B 15mm de espesor. De los seis bloques extraídos en primer lugar, se extrajeron dos probetas Mini-CT con la entalla orientada en el mismo sentido que a la probeta primigenia, como no podía ser de otra forma para caracterizar el material en la misma orientación.

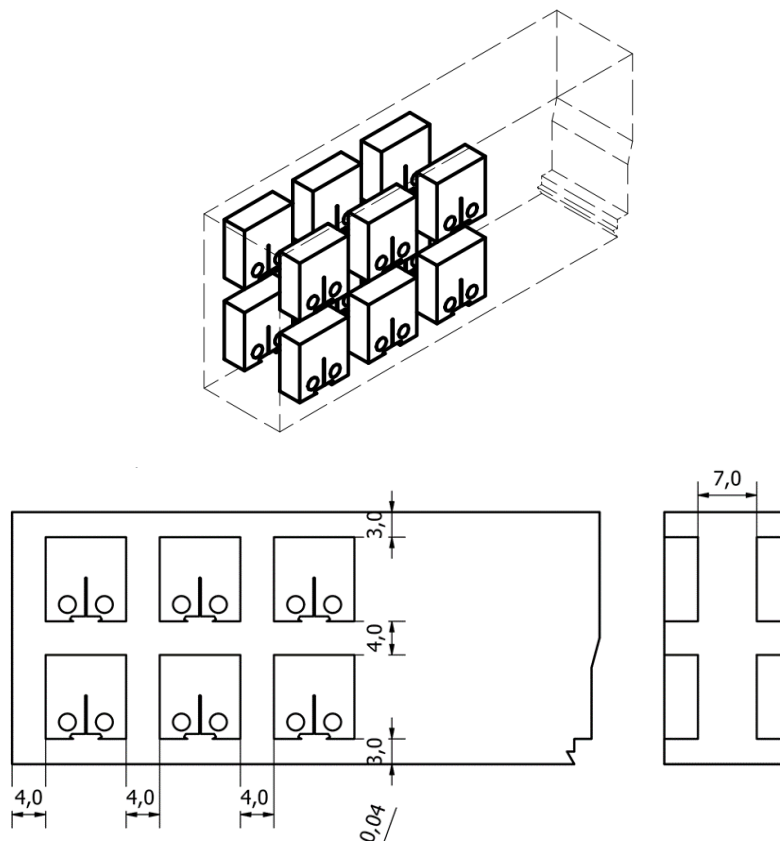


Figura 23. *Plano de extracción de las probetas 0,16 C(T) a partir de probetas SENB ensayadas de acero S460.*

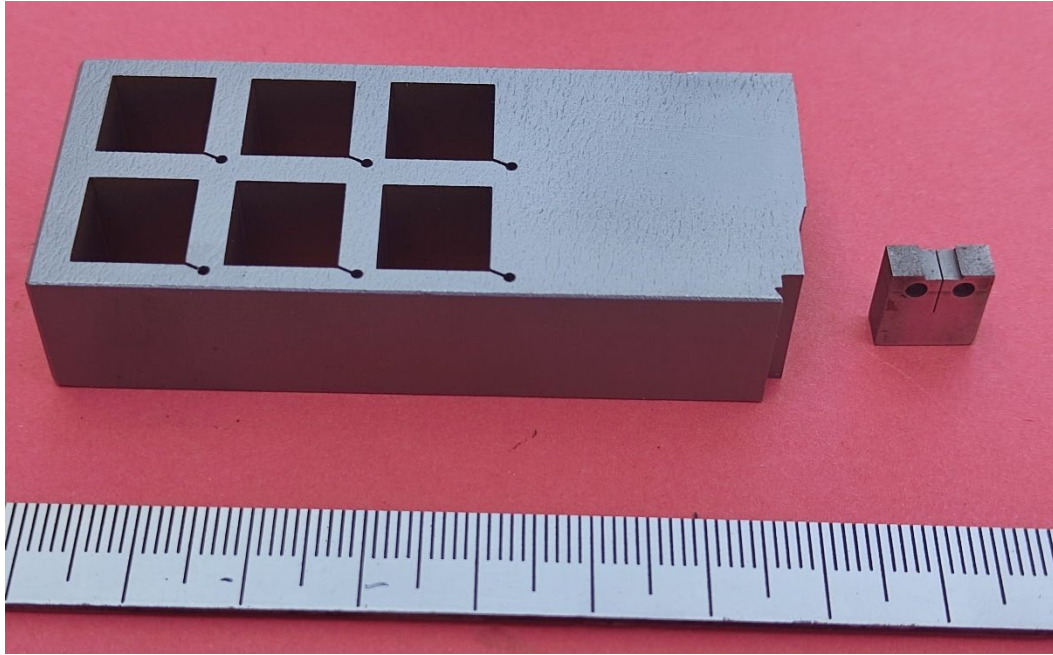


Figura 24. *Probeta 0,16 C(T) extraída a partir de probeta SENB ensayada de acero S460*

3.2.2. Prefisuración y medición del avance de grieta durante el ensayo

En la geometría de probeta Mini-CT seleccionada ($W=8\text{mm}$ y $B=4\text{mm}$), la longitud de la entalla inicialmente obtenida mediante electroerosión por hilo es de 3,2 mm, por lo que preliminarmente al ensayo la misma debe ser prefisurada mediante solicitaciones de fatiga una cierta longitud. Este se realiza con un doble propósito, por un lado, al igual que se hace en las probetas de dimensiones convencionales, obtener un defecto tipo fisura en lugar de la entalla mecanizada (electroerosionada en este caso); por otro lado, para conseguir la ratio de a/W adecuado.

En este trabajo se propone, al igual que la normativa indica para las probetas normalizadas, una longitud de grieta al inicio del ensayo, a_0 , de una entidad aproximadamente igual a B , es decir que se limita su rango al ratio a/W entre 0,45 y 0,55. Traduciendo esto a las dimensiones de la probeta Mini-CT el objetivo será llegar a una fisura inicial de aproximadamente 4mm, permitiéndose valores $3,6 < a_0 < 4,4 \text{ mm}$; habrá por ello que generar una grieta a partir de la entalla y hacerla crecer más o menos unos 0,8mm.

Par controlar este crecimiento de grieta durante la prefisuración, al igual que durante la ejecución de los ensayos de fractura propiamente dichos, se propone aplicar el método de la flexibilidad. Bien es cierto que existen otros que gozan de elevadas cotas de

aceptación hoy en día, tal como el método de la caída de potencial, pero dadas las pequeñas dimensiones de la probeta y la necesidad de realizar los ensayos a bajas temperaturas para la determinación de la temperatura de transición, que pueden introducir dispersión en las medidas, de momento se ha optado por no utilizarlos. Bien es cierto, por otro lado, que las citadas metodologías pueden ser tanto o más precisas que el método de la flexibilidad (hecho constatado en campañas experimentales previas), pero también lo es que la ganancia para el resultado final puede no ser detectable, ya que la evaluación de la longitud de grieta debe ser llevada a cabo por métodos ópticos tras el final del mismo de cara a la evaluación de resultados.

Es por todo ello, que para tener un conocimiento en tiempo real de la longitud de fisura durante la etapa de prefisuración y de ensayo, que va a ser corregida posteriormente en la etapa de análisis de datos con la medida óptica real, se estima que la evaluación de la flexibilidad mediante el empleo de dispositivos COD para medir el CMOD (crack mouth opening displacement) es suficiente. Así lo atestigua también la bibliografía [13].

Otra cuestión bien distinta, y sobre la que no existe un consenso universal, sino más bien que es un campo abierto en la evaluación de resultados experimentales a partir de ensayos en probetas 0.16T C(T), reside en el lugar de medición del CMOD, es decir de colocación de las patillas del COD, destacando como alternativas la línea de carga, LL (load line), o la cara exterior de la probeta, FF (front face). Para las medidas en línea de carga, LL, suelen emplearse un par de extensómetros enfrentados en sendas muescas habilitadas al efecto en las caras de la probeta durante el mecanizado, de forma que se asegure un posicionamiento estable de los mismos. En el caso de las medidas en la cara exterior, FF, se emplea un extensómetro tipo COD (clip on gauges).

Llegados aquí, un tema que se aborda a continuación es la equivalencia de ambos valores, ya que el tratamiento de datos recogido en la normativa, tanto para mini-CT como para probetas C(T) convencionales se realiza en función de los desplazamientos en la línea de carga, por ello las medidas en FF deben ser corregidas como paso previo. Para ello, y para cumplir con todas las variaciones permitidas en la geometría de la probeta recogidas en el punto 3.1, se acepta el empleo de la siguiente conversión basada en la relación geométrica (Landes 1980) [19]; que también se propone en ASTM E-1921-03 [16], donde $r \cdot (W-a)$ es la distancia del punto de rotación desde la punta de la grieta, y X el desplazamiento entre la cara frontal y la línea de carga.

$$R = \frac{v_{LL}}{v_{FF}} = \frac{a/W + r \cdot (1 - a/W)}{a/W + r \cdot (1 - a/W) + X/W}$$

En el presente trabajo, se propone la medida en la cara exterior, FF, mediante un extensómetro. De este modo, resulta ser de $R=0,73$ cuando se utilizan valores nominales de $a/W = 0,5$, $X/W = 0,25$ y $r = 0,3519$, es decir para el caso que nos aborda de mini-CT de 4mm de espesor con un ratio de grieta inicia $a/W=0.5$, en los entornos en que se moverán en los trabajos a desarrollar.

Para lo anterior, se debe emplear un extensómetro COD, con una base de medición mínima recomendada de 3.0 mm. Para su anclaje a la probeta asegurando la estabilidad requerida sin falseos en las medidas, dadas las dimensiones reducidas de la probeta y el hecho de que ya se utilizará la electroerosión por hilo para mecanizar la entalla, se propone incorporar filos en la superficie de la probeta durante el proceso de mecanizado. Otra opción alternativa podría ser el montaje de COD en la muestra mediante atornillado de la punta de las cuchillas, pero no es la opción preferida, dadas las dimensiones reducidas de la muestra y el efecto que los orificios roscados podrían causar en ella; tampoco se recomiendan las cuchillas pegadas en la superficie de la muestra para montar el COD, ya que los resultados podrían distorsionarse. En la Figura 27 siguiente se presenta una imagen del COD colocado en una probeta mini-CT durante el proceso de ensayo.

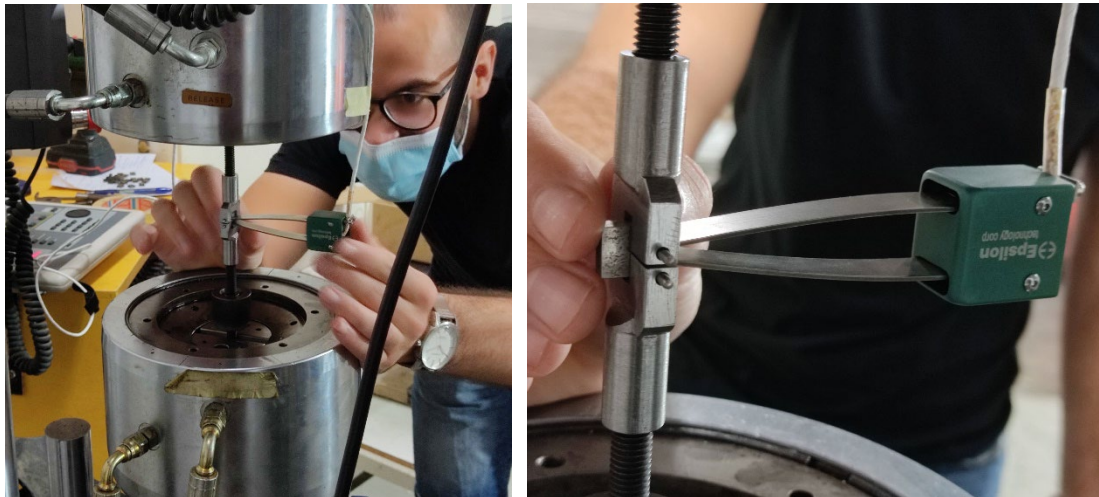


Figura 25. *Colocación de utillaje experimental en máquina de ensayos para prefisuración al aire y control de crecimiento de grieta mediante el método de la flexibilidad a través de COD colocado en la cara exterior de la probeta (FF).*

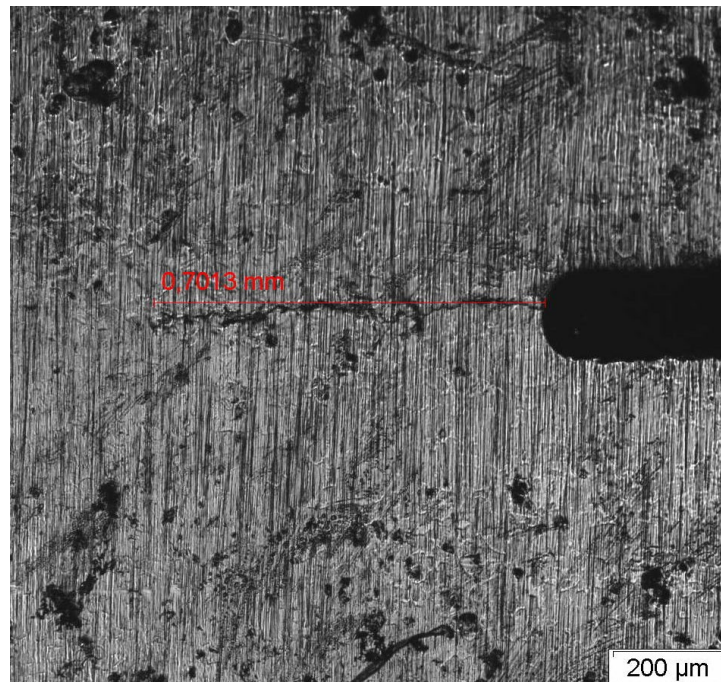


Figura 26. Control óptico de avance de fisura por métodos ópticos en los laterales de la probeta.

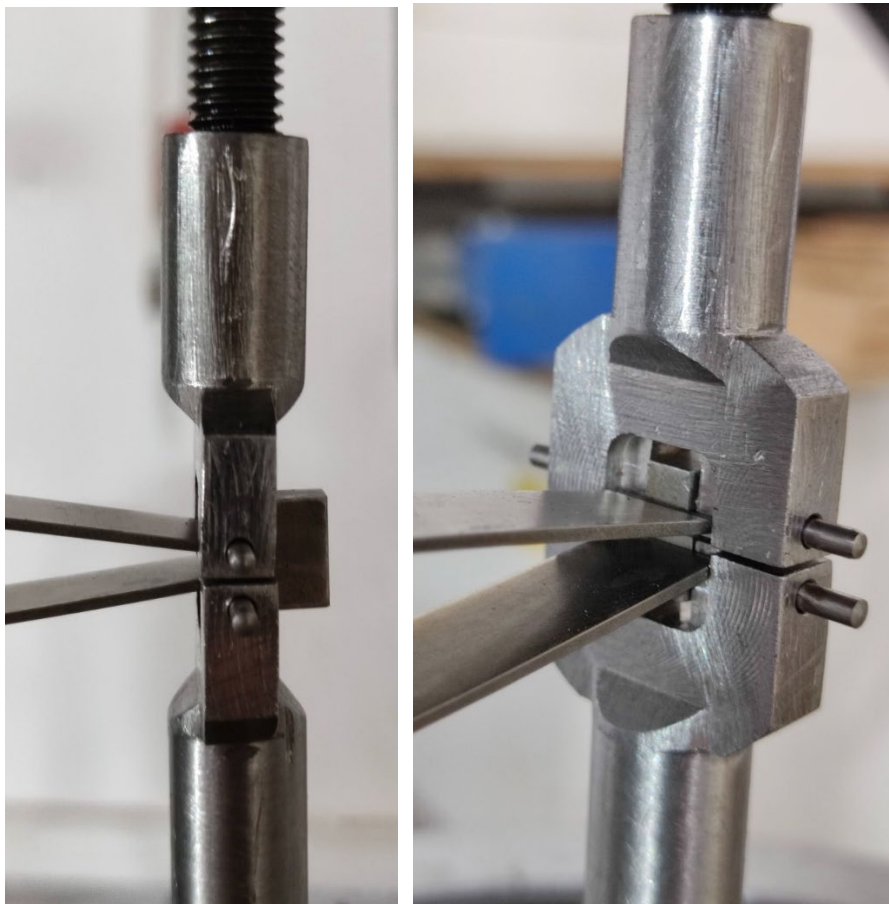


Figura 27. *Detalle de la medida de fisura mediante COD colocado en la cara exterior de una probeta mini-CT.*

3.3. MONTAJE EXPERIMENTAL PARA ENSAYOS DE MINI-CT A BAJAS TEMPERATURAS

Uno de los principales objetivos para la aplicación de probetas Mini-CT es su empleo en la caracterización de aceros de vasija, en los cuales el parámetro T_0 , o temperatura de referencia, es vital. Así en este TFM se pretende implementar un dispositivo para la determinación de la misma en base a estas probetas de reducidas dimensiones.

Como es bien sabido, para la determinación de la T_0 deben realizarse ensayos de fractura a diversas temperaturas en un rango de aproximadamente $\pm 50^\circ\text{C}$ de la temperatura de referencia, tras los cuales se aplica el concepto de curva patrón con sus implicaciones estadísticas (Weibull).

Así, en esencia, el fin perseguido en este trabajo en la realización de ensayos de fractura K_{Jc} sobre probetas 0.16T C(T) a bajas temperaturas. Para ello será imprescindible requerir y/o adaptar diversos medios como son: máquina de ensayo dinámica, cámara climática, controles de temperatura, sistemas de adquisición de datos, ... de los cuales se habla sucintamente a continuación. Además, será necesario también diseñar un sistema de utillajes que, en base a los requerimientos de la normativa [16], permitan acoplar la probeta mini-CT a una máquina de ensayos universal y facilite la compatibilidad absoluta con los citados elementos.

3.3.1. Equipamientos estándar a emplear

Para los ensayos de fractura del Mini-CT se deben utilizar los siguientes equipamientos habituales en cualquier ensayo de mecánica de la fractura, teniendo en cuenta las puntualizaciones llevadas a cabo en el presente capítulo para probetas miniatura.

Máquina dinámica:

- Se propone el empleo de una máquina servohidráulica que permite la aplicación de cargas cíclicas para una adecuada pre-fisuración. La misma permite el control de desplazamiento y control de carga.
- Se propone el empleo de una célula de carga suficientemente precisa para las cargas de pequeña magnitud que se midan durante el ensayo, para ello una célula de $\pm 5\text{kN}$ se estima conveniente.
- Debe asegurarse una correcta alineación del eje de la máquina, para evitar efectos de segundo orden en las probetas. Para este propósito, siempre se recomiendan dispositivos de ensayo que incorporen rótulas,

incluso si la alineación de la máquina está certificada; cuestión que se aborda en el siguiente epígrafe.

Cámara climática:

- Se propone la incorporación de una cámara climática a la máquina de ensayo, de tal manera que la Mini-CT que se está ensayando (más la horquilla, el COD y los dispositivos auxiliares, cuando sea necesario) estén contenidos en ella.
- La refrigeración de la cámara se puede obtener mediante un equipo de frío industrial incorporado (compresor, radiador, etc.) o mediante la inyección de elementos gaseosos (es decir, nitrógeno o argón). En el presente TFM se ha optado por una refrigeración mediante la inyección de nitrógeno líquido regulada mediante un controlador Eurotherm con una precisión inferior a $\pm 1^{\circ}\text{C}$.

Termopares:

- La temperatura en el volumen de control de ensayo debe ser monitoreada por medio de un termopar durante el ensayo de fractura.
- ASTM E-1921 [4] recomienda monitorear y controlar la temperatura de ensayo directamente en la muestra. Sin embargo, en probetas pequeñas, las dimensiones y el peso del termopar se vuelven relativamente grandes, lo que podría interferir con el montaje de la muestra. Para evitar esto, se propone acoplar termopares a la horquilla en las inmediaciones de la probeta. Se asumen diferencias de temperatura de $\pm 3^{\circ}\text{C}$ entre la horquilla y la muestra según bibliografía [1].
- El termopar debe estar acoplado de tal forma que se asegure un contacto directo y constante durante todo el ensayo. Este accesorio puede ser mecánico (atornillado, sujetado, etc.) o pegado; si se utilizan colas o resinas, se debe asegurar su durabilidad durante todo el ensayo. Algunos autores han fijado termopares a la superficie posterior de las probetas mediante un mecanismo de fijación por resorte. En este trabajo se opta por la adhesión a las horquillas mediante cinta adhesiva resistente a bajas temperaturas.

Sistema de adquisición de datos:

- Durante los ensayos, los datos se registran de manera continua y luego son transferidos a formato Excel. Como resultado, se proporcionarán registros

continuos de carga y de desplazamiento de la línea de carga para el tratamiento adicional de los datos [19] empleando la corrección anteriormente indicada; otros datos como las propiedades del material y la longitud de la grieta (medida en la superficie de la fractura) también se incorporarán al formato Excel de informe de ensayo.

- Se empleará un sistema de adquisición de datos incorporado en la máquina de dos canales (carga y COD).
- También se tomarán datos durante el proceso de prefisuración con fines de control, pero estos datos no se utilizarán para análisis posteriores.

3.3.2. *Diseño específico de utillajes para el ensayo de 0.16T C(T)*

Como anteriormente se ha introducido, existen sendos utillajes para conectar la probeta mini CT con los ejes de la máquina de ensayos, mientras los mismos permiten el paso a través de una cámara climática a temperatura controlada. En la Figura 28 se presenta un modelo 3D de la apariencia del montaje.

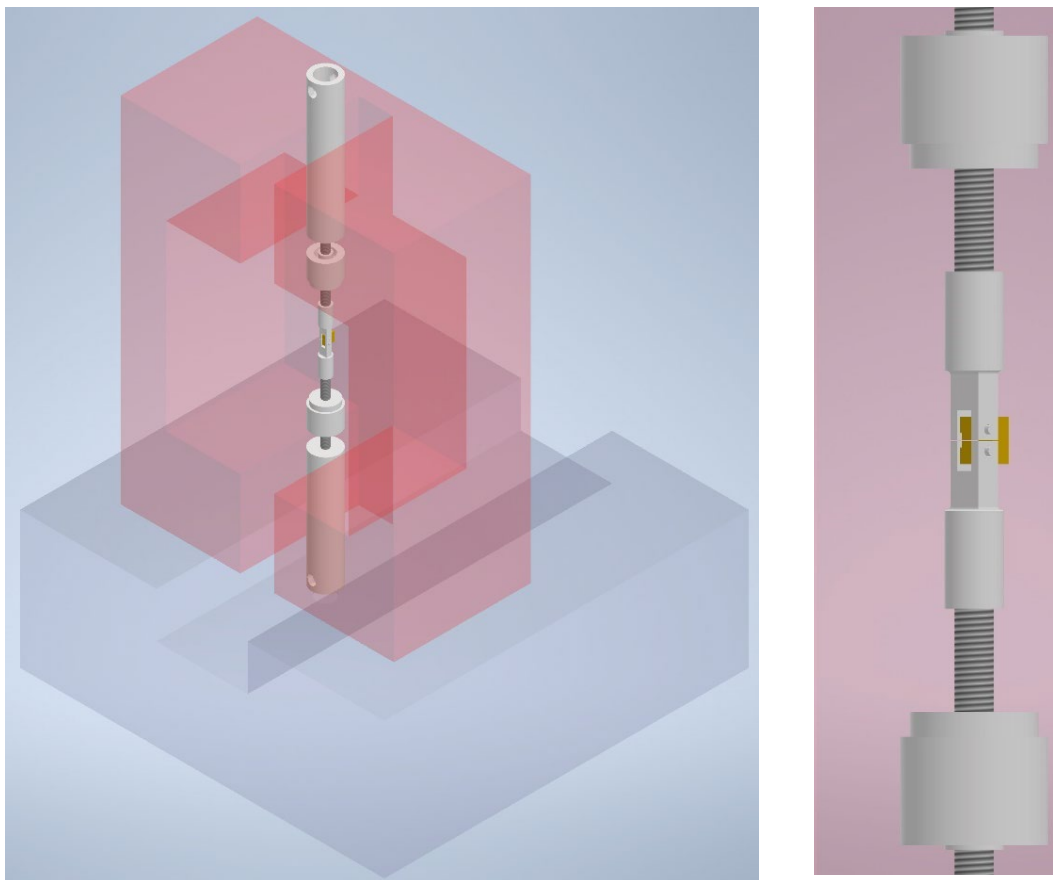


Figura 28. *Modelo 3D de la configuración experimental propuesta.*



Figura 29. *Configuración experimental para ensayos de fractura en probeta Mini-CT a baja temperatura, introduciendo el utillaje dentro de una cámara climática con control de temperatura y enfriamiento a través de inyección de Nitrógeno líquido gasificado.*

Los principales elementos que se han diseñado y construido, presentados en la explosión y modelo 3D en la Figura 30 siguiente, y que se describen a continuación, son: horquillas, rótulas y transmisores de carga.

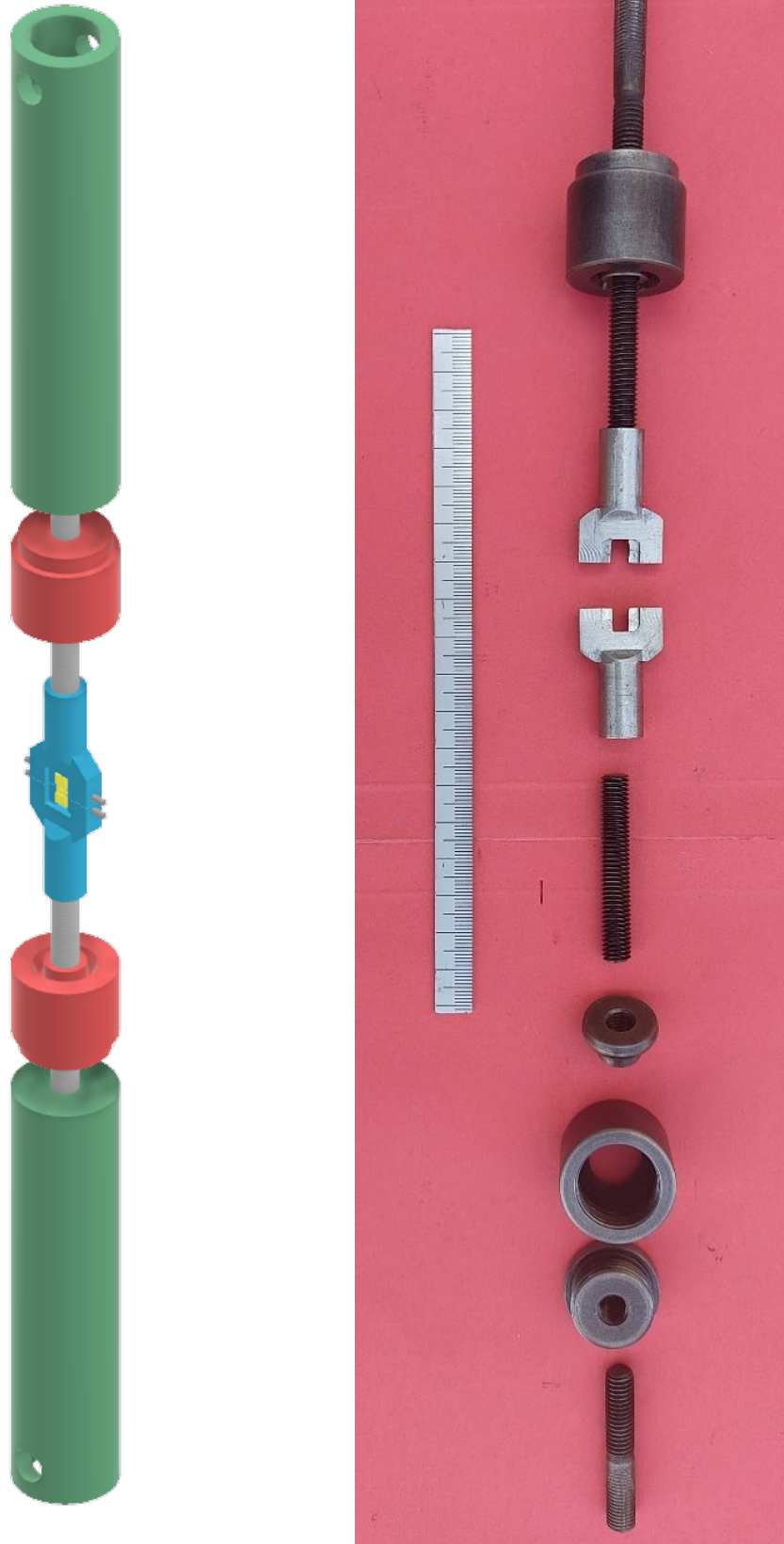
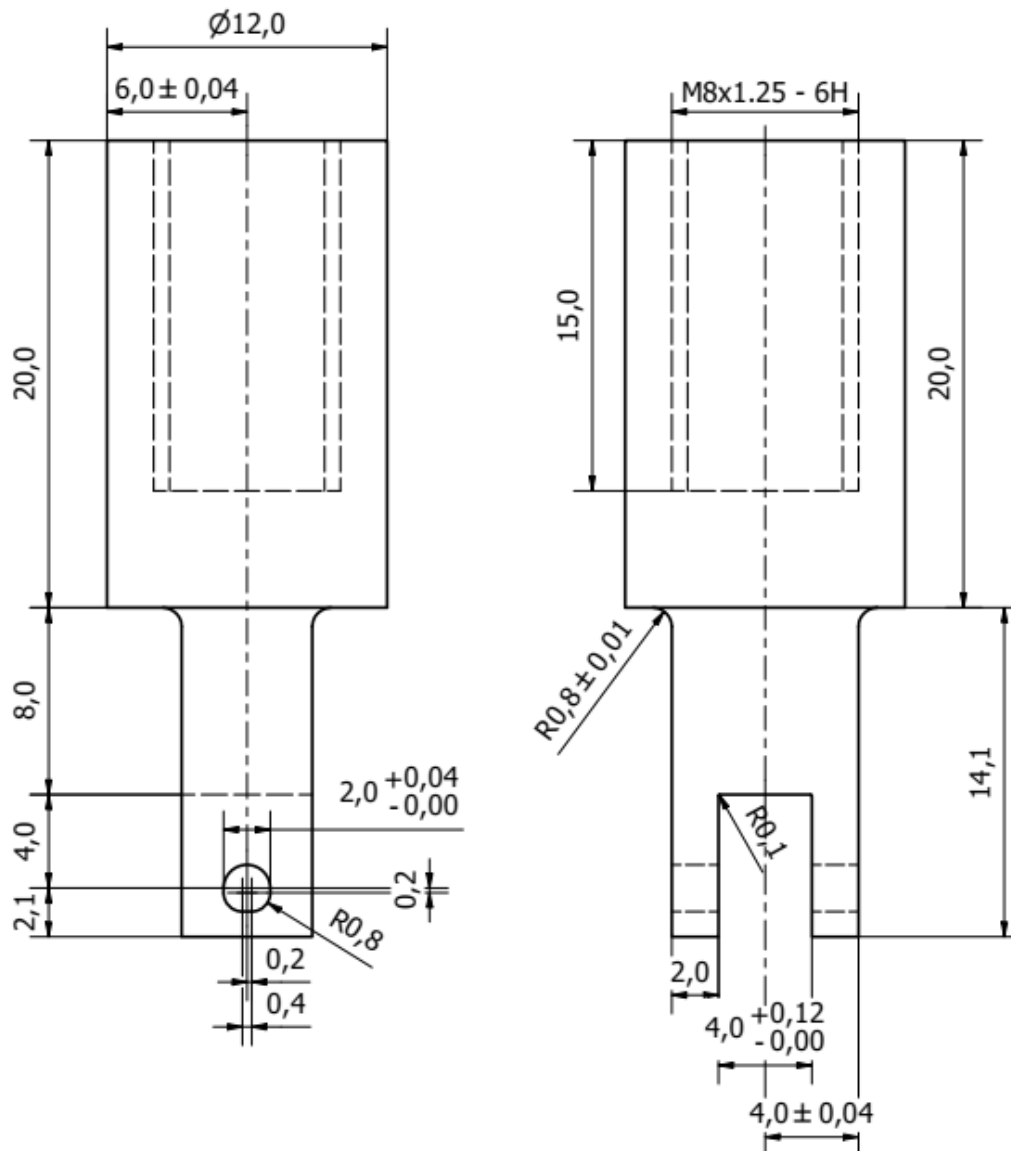


Figura 30. Modelo 3D y *vista* explosionada del utillaje diseñado y construido.

Horquillas:

- La horquilla debe seguir los requisitos de ASTM E-1921 [16] para la geometría de la muestra C (T) seleccionada ($W=2B=8$ mm). Así como debe permitir el paso de las patillas del COD entre sus orejetas. En una primera tentativa (versión 1.0) se optó por la reproducción a escala de las horquillas recogidas por la norma ASTM E-1921 [16], empleando para ello un acero templado y revenido de la familia F-115 con una dureza de 60HRC. Lamentablemente, tras una primera prueba experimental las mismas se fracturaron debido a la elevada concentración de fuerzas de contacto puntuales en la intercara con los pasadores (ver Figura 32), y además no se conseguía un óptimo posicionamiento del COD.



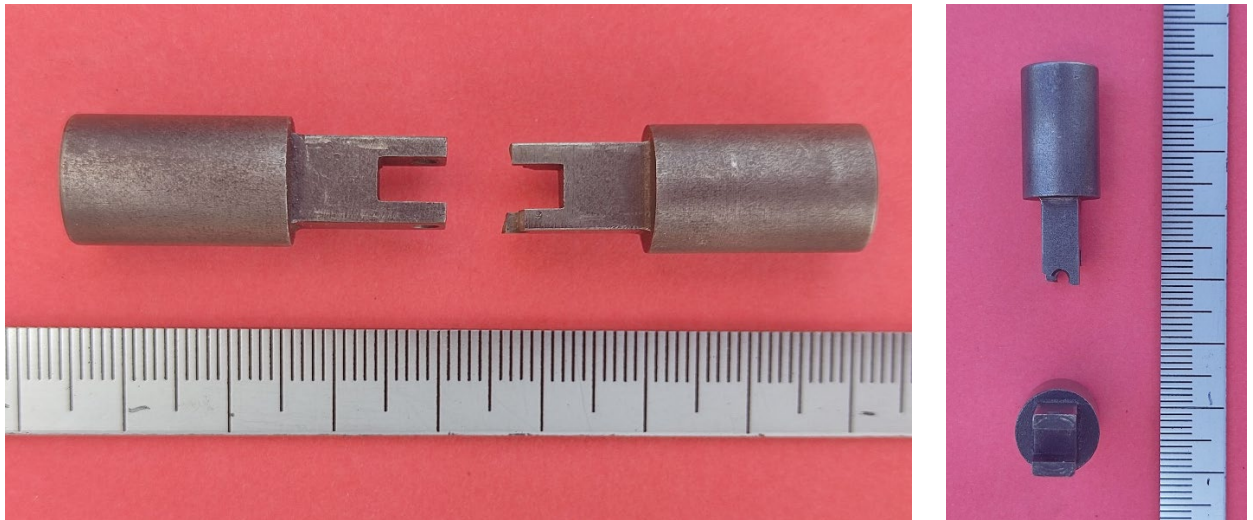


Figura 32. *Horquilla de ensayos (fracturada) Versión 1.0*

- Como optimización, se propuso la versión 2.0, en la cual se incrementó por un factor de 2,5 el espesor de las orejetas (zona donde se produjo el fallo), y se amplió su espaciado desde 4mm hasta 12mm para una mejor colocación del COD. Se cambió de material, usándose un acero martensítico de calidad 12.9 procedente de redondos de alta resistencia con una dureza superior a 350HV; en esta ocasión el comportamiento mecánico obtenido fue el adecuado. Sin embargo, se observó que la probeta se desplazaba lateralmente entre las orejetas de la horquilla, lo que podría dar lugar a imprecisiones en las mediciones. El diseño y modelo construido se presenta en la Figura 34 y Figura 33.



Figura 33. *Horquilla de ensayos Versión 2.0*

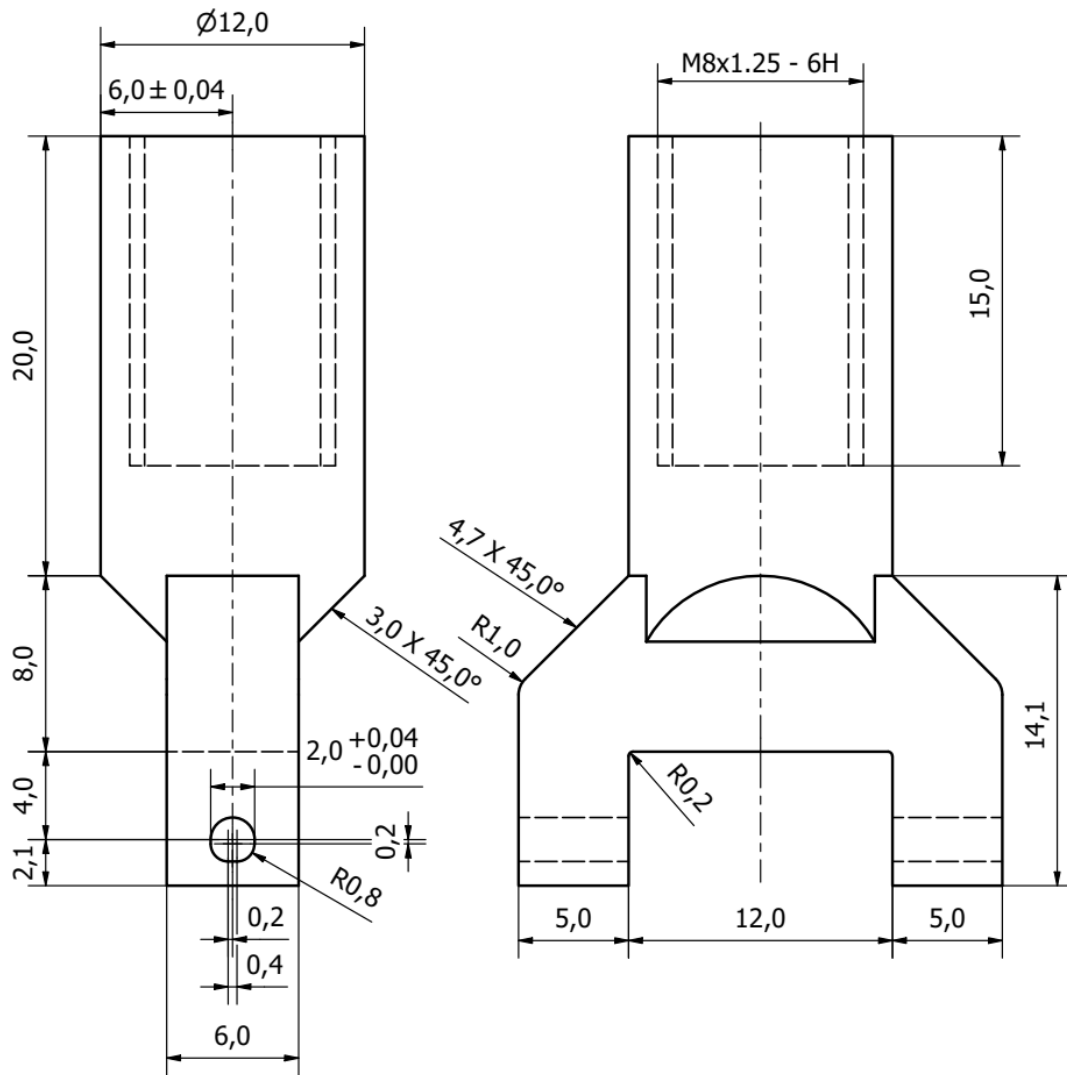


Figura 34. Plano de la horquilla de ensayos Versión 2.0

- Finalmente, para evitar el movimiento lateral de la probeta permitiendo un buen acople del COD, se llevó una tercera iteración en el diseño de la horquilla. Si bien se fabricó en el mismo material que la versión anterior, esta optimización 3.0, y versión definitiva, presenta una zona exterior donde las orejetas están separadas 12mm y donde entran las patillas del COD, mientras el resto presenta un relleno para dejar una separación de 4mm y evitar movimientos laterales de la probeta. El diseño definitivo 3.0 se presenta en la Figura 35 y Figura 36.

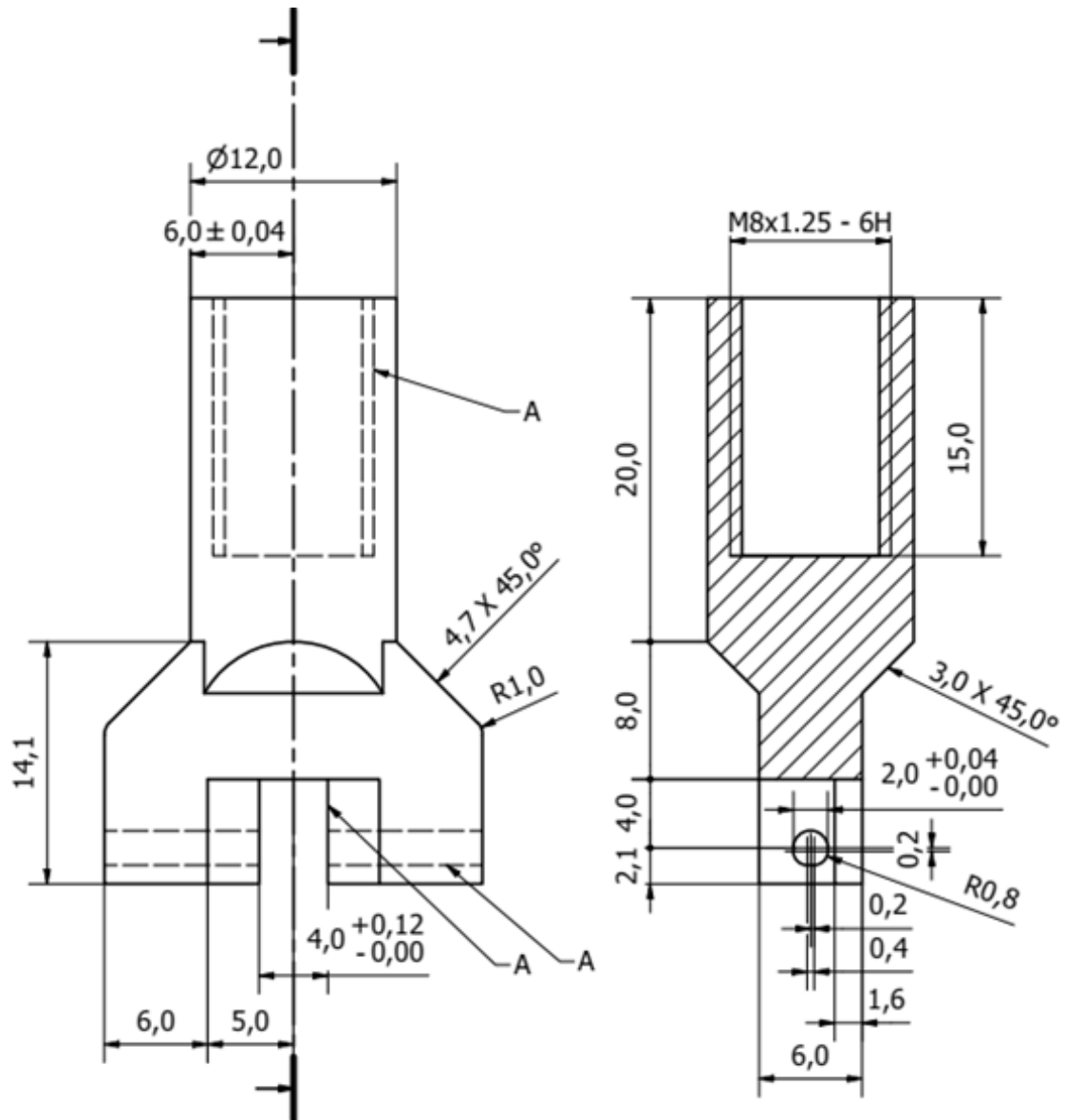


Figura 35. Plano de la horquilla de ensayos Versión 3.0

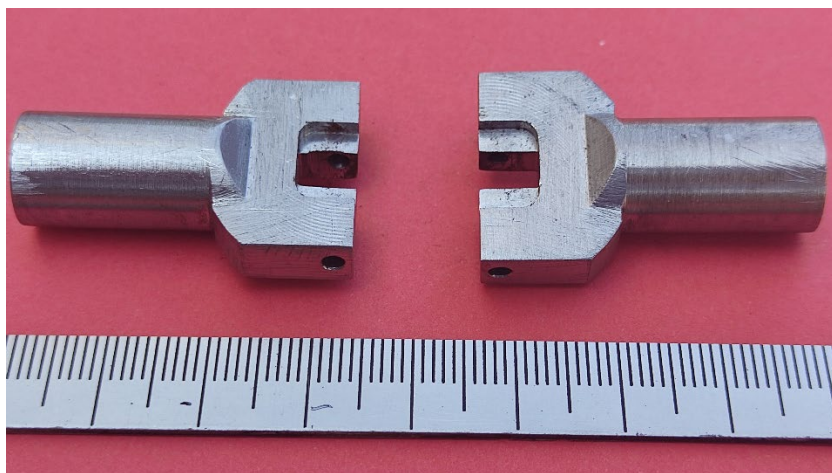


Figura 36. *Horquilla de ensayos Versión 3.0*

Rótulas:

- Este elemento es de empleo habitual en los ensayos de mecánicos con sollicitaciones uniaxiales. Como es bien sabido, una rótula impide la transmisión de momentos permitiendo la de los esfuerzos, por lo que asegura una perfecta linealidad de las cargas según el eje de los elementos que conecta. Dada la minuciosidad necesaria en el ensayo de Mini-CT, producida por las reducidas dimensiones de la probeta, su empleo resulta muy altamente recomendable, sino vital.
- En la propuesta de utillaje que se presenta, se ha tomado como referencia una tipología de rótula cuya fiabilidad y robustez ha sido validada durante décadas en el laboratorio LADICIM para ensayos de mecánica de la fractura en diversas condiciones de temperatura y ambientes agresivos. Para conseguir la precisión necesaria, en el diseño llevado a cabo, presentada en la Figura 38, se ha procedido a un escalado del diseño original, de modo que la misma tuviera unas dimensiones comparables a las de la probeta, y que fuese capaz de albergar las conexiones roscadas con los vástagos de conexión pertinentes de una métrica tal que permita la transmisión de los esfuerzos mecánicos sin comprometer la integridad de dichas conexiones (ver más adelante que se utilizaron vástagos roscados de M8).
- El material seleccionado para la construcción fue acero templado y revenido de la familia F-115 con una dureza de 60HRC. Para asegurar el correcto funcionamiento de la rótula la misma debe ser desensamblada y lubricada cada cierto tiempo de uso.

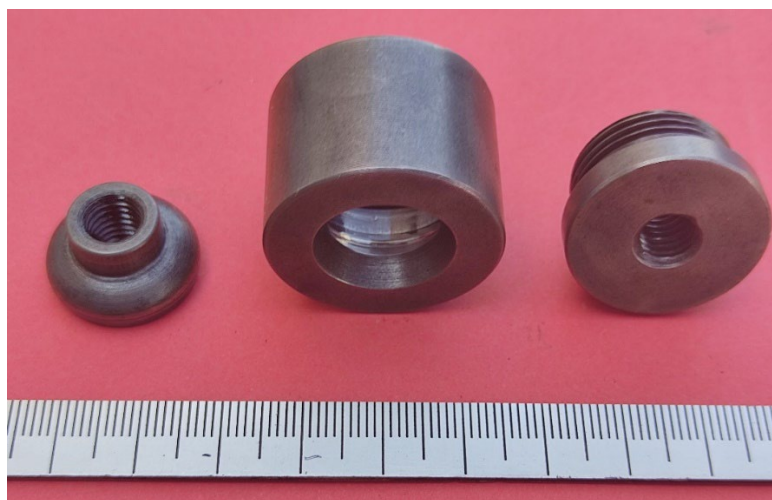


Figura 37. *Imagen de una de las rótulas tras su construcción.*

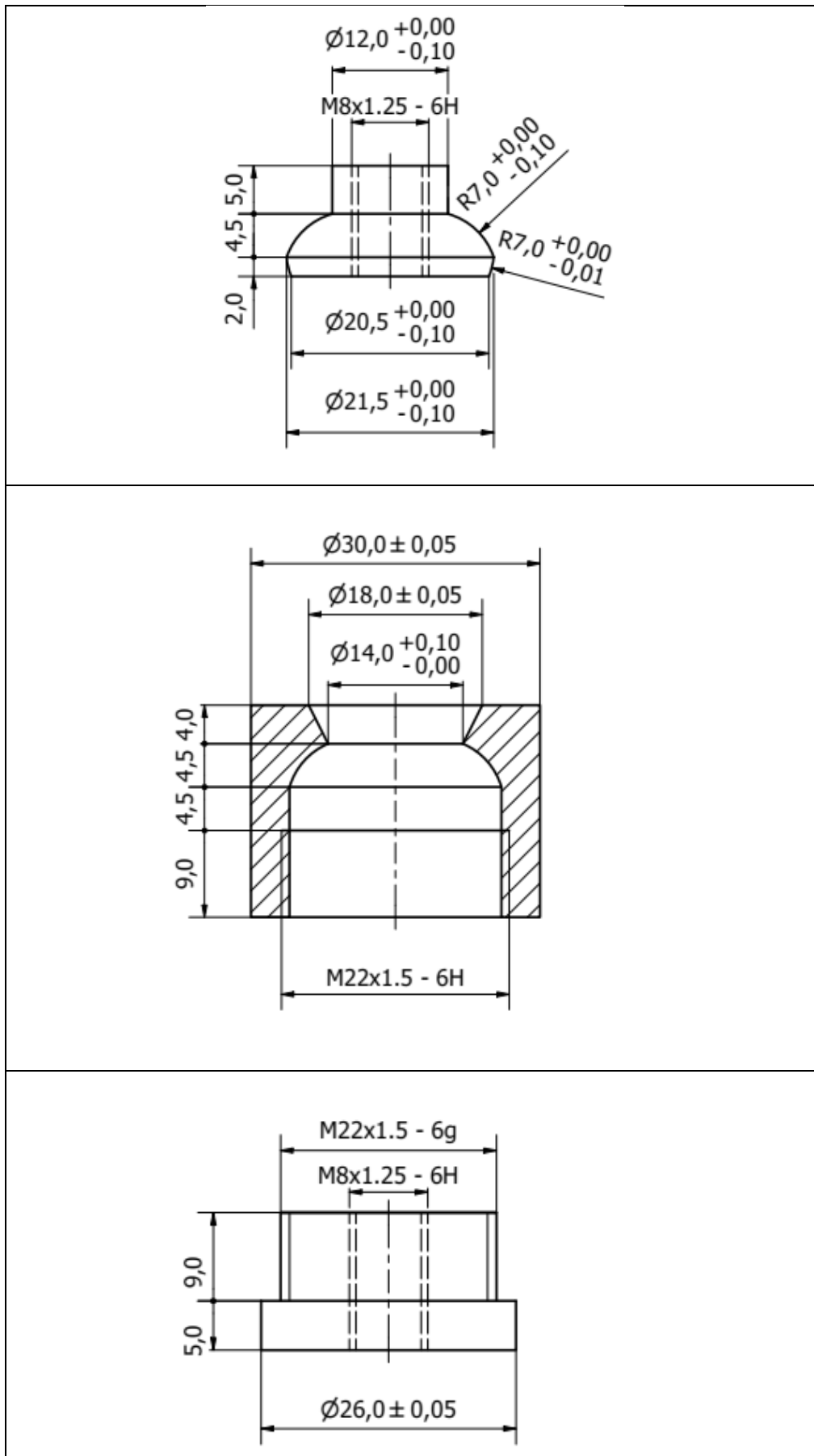


Figura 38. *Diseño de las rótulas miniatura empleadas.*

Vástagos extensores:

- Para conectar la parte principal del utillaje, horquillas y rótulas, con la máquina de ensayos fue necesario acoplar una serie de vástagos extensores, que permiten además conseguir la longitud necesaria para que las mordazas de la máquina permanezcan fuera de la cámara climática en todo momento.
- Para las conexiones horquilla-rótula se empleó varilla roscada comercial de calidad 12.9 y M8, de modo que se asegurase su resistencia mecánica a los esfuerzos susceptibles de ser aplicados en todo momento, así como la resistencia de los filetes de la unión roscada. Se tomó en cuenta para el cálculo, según [20], que los 6 primeros filetes de rosca son los que se llevan la totalidad de la carga, asegurando siempre el contacto de un número mayor de filetes en cada unión (evidentemente este concepto fue implementado también en el diseño de las rótulas y horquillas).
- Para las conexiones rótula-mordaza se empleó nuevamente material de calidad 12.9 y M8, asegurando el enroscado de 6 filetes al menos. Sin embargo, en esta ocasión tras una primera zona roscada el resto se trataba de un fuste cilíndrico liso (se obtuvo mediante el corte de la cabeza en pernos M8x80mm de calidad 12.9 comerciales).
- Como muestra la Figura 39, se mecanizaron también otros vástagos de 30mm de diámetro cilíndricos para emplear a modo de pasamuros cuando se realicen los ensayos dentro de la cámara climática. En esta ocasión el material elegido fue acero templado y revenido de la familia F-115 con una dureza de 60HRC. Estos elementos incorporaban en su parte final unos orificios de conexión para máquinas de ensayos que no posean mordazas hidráulicas.
- Finalmente, y no por ello menos importante, Figura 41, el pasador empleado para fijar la probeta mini-CT a las horquillas fue un pasador industrial de origen comercial de $\varnothing 1,9\text{mm}$, es cual encajaba perfectamente en las tolerancias de diseño de $1,92^{+0,00}_{-0,04}\text{ mm}$.

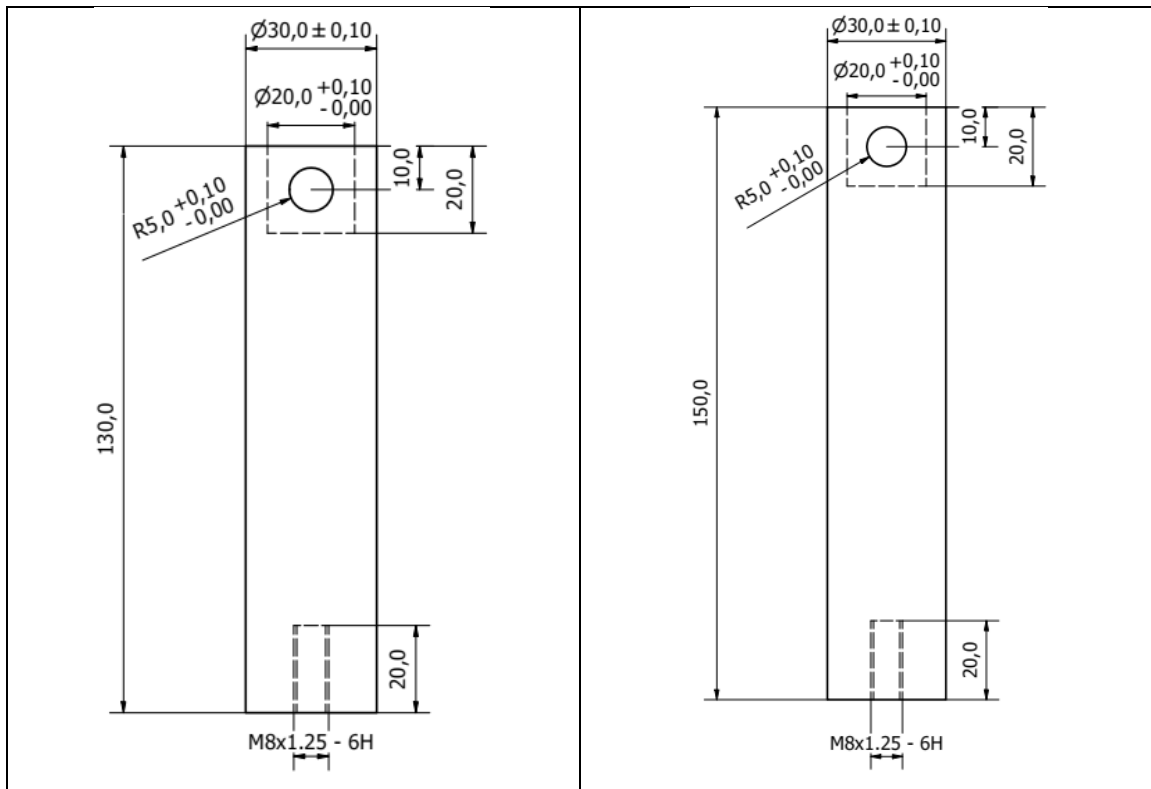


Figura 39. Planos de soportes inferior (izquierda) y superior (derecha)



Figura 40. Soportes inferior (izquierda) y superior (derecha)

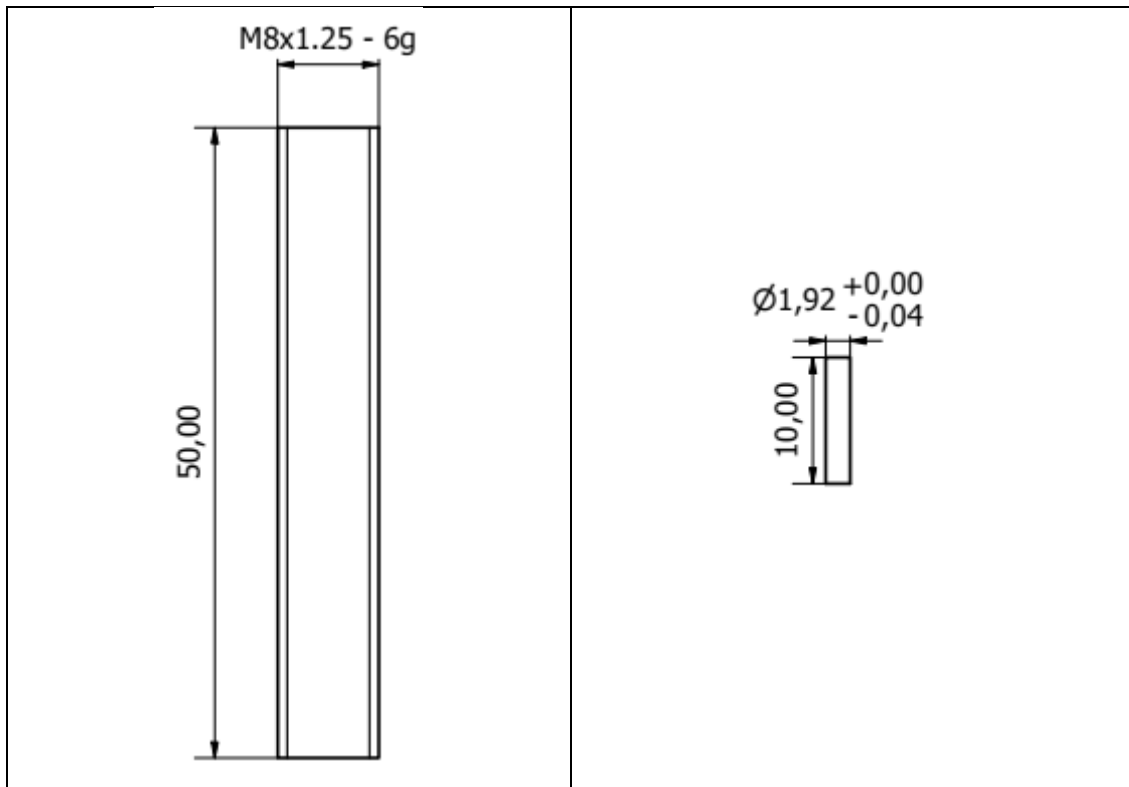


Figura 41. Planos de soportes espárrago roscado y bulón/pasador.

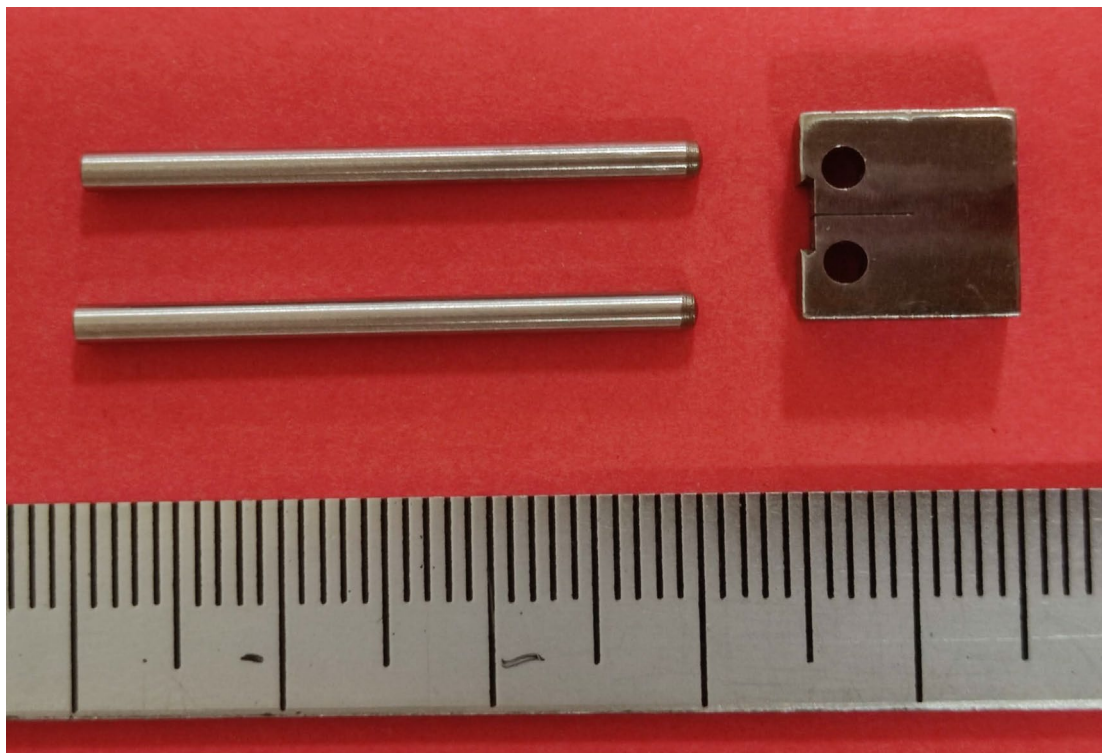


Figura 42. Soportes espárrago roscado y bulón/pasador.

3.4. PARÁMETROS DE ENSAYO Y ACCIONES TRAS LA FINALIZACIÓN DEL MISMO

3.4.1. Parámetros de control durante el ensayo

En el presente TFM se propone realizar los ensayos en control de desplazamiento, según lo recomendado por ASTM E-1921 [16]. La literatura [21] recopila velocidades de ensayo en el rango de dK/dt de 0.1 a 2.0 MPa.m^{1/2}/s, por lo que en esta propuesta se estima que velocidades en los entornos de $dK/dt = 1$ MPa.m^{1/2}/s son las más idóneas para ser empleadas.

3.4.2. Acciones inmediatas tras la finalización del ensayo

Una vez finalizado el ensayo, las probetas se secarán inmediatamente para eliminar todos los posibles rastros de agua que pueden aparecer por condensación y pueden generar oxidación superficial. Luego, las superficies de fractura deben examinarse mediante microscopía electrónica de barrido (SEM) antes de producirse su oxidación. El análisis SEM incluirá la observación de la fractografía con el fin de determinar los micromecanismos de la fractura y los sitios de inicio de la fractura.

Finalmente, deberá tomarse una macrografía para evaluar la longitud real de la grieta al inicio del ensayo, a_0 , es decir tras la prefisuración. Dicha evaluación se hará de acuerdo con los preceptos de ASTM E-1921 [16], que básicamente consisten en realizar 9 medidas equidistantes y tomar como resultado de longitud de grieta su media ponderando los dos valores laterales por 0,5 y el resto por 1 (corrección de la curvatura en los extremos por las diferentes condiciones de confinamiento). Con ello podrá procederse a la corrección de los valores determinados según el método de la flexibilidad con el COD, de cuyas imprecisiones ya se ha hablado dentro de este capítulo (sección 3.2.2).

3.5. TRATAMIENTO EXPERIMENTAL DE LOS DATOS

Como se ha ido comentando a lo largo del documento, el fin de estos ensayos es caracterizar a fractura aceros de vasija, los parámetros principales a determinar serán

dos: la tenacidad K_{Jc} y la temperatura de referencia T_0 ; la normativa que aborda su evaluación, ASTM E-1921 [16], recoge procedimientos para ambas.

En este trabajo se han programado en sendas hojas de cálculo mediante el software Microsoft® Excel [22], empleando herramientas de programador y solver implementadas en el mismo para tales fines.

3.5.1. Obtención de K_{Jc}

Tal como se muestra en la Figura 43 y Figura 44, en primer lugar, deben introducirse los datos brutos directos derivados del ensayo, que son la carga (N) y el desplazamiento de la línea de carga (mm). En esta hoja, el rango de datos disponible es de hasta 10^5 , por lo que, si es necesario considerar ensayos más largos, la hoja o los datos deben ser modificados por el usuario.

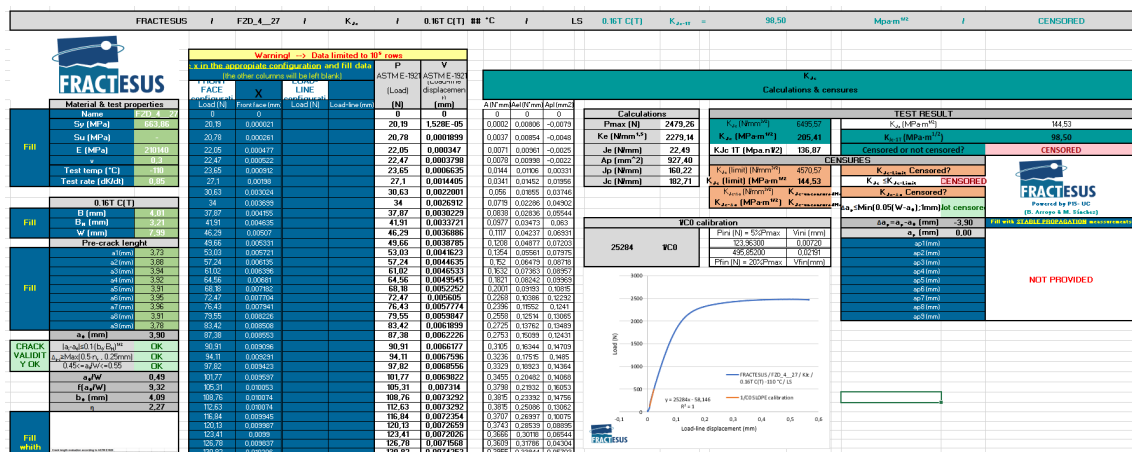


Figura 43. Vista general de la hoja de cálculo para la determinación de K_{Jc} .

Tras ello, la pestaña tiene dos columnas para introducir el CMOD obtenido por un COD en la cara frontal, FF, o el desplazamiento de la línea de carga, LL, obtenido por un LVDT; dejando en blanco la columna no utilizada, la hoja de datos llenará directamente una tercera columna con el valor corregido del desplazamiento de la línea de carga (si es necesario) de acuerdo con la propuesta de Landes antes mencionada (cuyos parámetros también se pueden introducir).

Otros datos como las propiedades del material y la longitud de la grieta (medida en la superficie de la fractura) también se incorporarán en esta pestaña.


		Warning! -> Data limited to 10 ⁵ rows					
		Type x in the appropriate configuration and fill data for it (the other columns will be left blank)				P	V
Material & test properties		FRONT FACE configuration	X	LOAD-LINE configuration		ASTM E-1921 (Load) (N)	ASTM E-1921 (Load-line displacement) (mm)
Fill	Name	FZD_4_27	0	0		0	0
	S _y (MPa)	663,86	20,19	0,00021		20,19	1,52783E-05
	S _u (MPa)	-	20,78	0,000261		20,78	0,000189888
	E (MPa)	210140	22,05	0,000477		22,05	0,000347037
	v	0,3	22,47	0,000522		22,47	0,000379776
	Test temp (°C)	-110	23,65	0,000912		23,65	0,000663516
	Test rate (dK/dt)	0,85	27,1	0,00198		27,1	0,001440529
			30,63	0,003024		30,63	0,002200081
			34	0,003699		34	0,00269117
			37,87	0,004155		37,87	0,003022929
Fill	B (mm)	4,01	41,91	0,004635		41,91	0,003372148
	B _N (mm)	3,21	46,29	0,00507		46,29	0,003688628
	W (mm)	7,99	49,66	0,005331		49,66	0,003878516
Pre-crack length							
Fill	a ₁ (mm)	3,73	53,03	0,005721		53,03	0,004162256
	a ₂ (mm)	3,88	57,24	0,006135		57,24	0,004463458
	a ₃ (mm)	3,94	61,02	0,006396		61,02	0,004653346
	a ₄ (mm)	3,92	64,56	0,00681		64,56	0,004954547
	a ₅ (mm)	3,91	68,18	0,007182		68,18	0,005225192
	a ₆ (mm)	3,95	72,47	0,007704		72,47	0,005604968
	a ₇ (mm)	3,96	76,43	0,007941		76,43	0,005777395
	a ₈ (mm)	3,91	79,55	0,008226		79,55	0,005984744
	a ₉ (mm)	3,78	83,42	0,008508		83,42	0,00618991
CRACK VALIDITY OK	a ₀ (mm)	3,90	87,38	0,008553		87,38	0,00622265
	a ₁ -a ₀ ≤ 0.1·(b ₀ -B _N) ^{1/2}	OK	90,91	0,009096		90,91	0,006617704
	Δ _{pc} ≥ Max(0.5·n _r , 0.25mm)	OK	94,11	0,009291		94,11	0,006759574
	0.45 ≤ a ₀ /W ≤ 0.55	OK	97,82	0,009423		97,82	0,006855609
	a ₀ /W	0,49	101,77	0,009597		101,77	0,006982201
	f(a ₀ /W)	9,32	105,31	0,010053		105,31	0,007313959

Figura 44. Parte de la hoja de cálculo para la determinación de K_{Jc} correspondiente a la introducción de datos del ensayo.

K _{Jc}									
Calculations & censures									
A (N*mm)	Ael (N*mm)	Ap1 (mm2)							
0	0	0							
0,00015	0,0080613	-0,007907							
0,00373	0,0085393	-0,004808							
0,0071	0,009615	-0,002519							
0,00783	0,0099847	-0,00216							
0,01437	0,011061	0,003307							
0,03408	0,0145234	0,019562							
0,05601	0,0185534	0,037456							
0,07188	0,0228606	0,049018							
0,0838	0,028361	0,05544							
0,09773	0,0347349	0,062996							
0,11169	0,0423745	0,069313							
0,1208	0,048769	0,072029							
0,13537	0,0556126	0,079754							
0,15197	0,0647932	0,08718							
0,1632	0,0736334	0,089568							
0,18211	0,0824247	0,096689							
0,20008	0,0919272	0,108149							
0,22678	0,1038596	0,122924							
0,23962	0,1155202	0,124101							
0,25579	0,1251442	0,130648							
0,27251	0,1376165	0,134894							
0,27531	0,1509921	0,124314							
0,31052	0,1634382	0,147085							
0,32365	0,1751466	0,148501							
0,33286	0,1892281	0,143636							
0,3455	0,2048188	0,140678							
0,37985	0,2193156	0,160532							
0,38148	0,2339207	0,147562							
0,38148	0,250864	0,130619							
0,37071	0,2699687	0,100746							
0,37434	0,2853864	0,088949							
0,36663	0,3011833	0,065444							
Calculations			TEST RESULT						
Pmax (N)	2479,26		K _{Jc} (N/mm ^{3/2})	6495,57		K _{Jc} (MPa·m ^{1/2})	144,53		
Ke (N/mm ^{1.5})	2279,14		K _{Jc} (N/mm ^{3/2})	205,41		K _{Jc-1T} (MPa·m ^{1/2})	98,50		
Je (N/mm)	22,49		K _{Jc-1T} (MPa·m ^{1/2})	136,87		Censored or not censored?	CENSORED		
Ap (mm ²)	927,40								
Jp (N/mm)	160,22								
Jc (N/mm)	182,71								
1/C0 calibration			CENSURES						
Pini (N) = 5%Pmax	Vini (mm)		K _{Jc} (limit) (N/mm ^{3/2})	4570,57		K _{Jc} Censored?			
123,96300	0,00720		K _{Jc} (limit) (MPa·m ^{1/2})	144,53		K _{Jc} SK _{Jc} limit	CENSORED		
495,85200	0,02191		K _{Jc-1T} (N/mm ^{3/2})			K _{Jc-1T} Censored?			
Pfin (N) = 20%Pmax	Vfin (mm)		K _{Jc-1T} (MPa·m ^{1/2})			Δa _p SMin(0.05(W-a ₀);1mm)	Not censored		
						Δa _p = a _p - a ₀ (mm)	-3,90		
						a _p (mm)	0,00		
						ap1 (mm)			
						ap2 (mm)			
						ap3 (mm)			
						ap4 (mm)			
						ap5 (mm)			
						ap6 (mm)			
						ap7 (mm)			
						ap8 (mm)			
						ap9 (mm)			
									NOT PROVIDED

Figura 45. Parte de la hoja de cálculo para la determinación de K_{Jc} correspondiente a los cálculos y verificación de censuras.

Más a la derecha, la hoja (Figura 45) contiene implementados los cálculos necesarios para obtener el resultado del ensayo de tenacidad a la fractura. La ficha dará como resultados directos K_{Jc} , $K_{Jc-Limit}$, $K_{Jc-\Delta a}$, verificará todas las posibles censuras y finalmente determinará si el ensayo está censurado o no, calculará el valor de K_{Jc} , y a partir de este el valor K_{Jc-1T} equivalente aplicando la corrección recogida en ASTM E-1921 [16].

Finalmente, para obtener una salida de datos más visual y que permita observar el resultado de cada ensayo de un solo vistazo, se ha programado una segunda pestaña resumen de datos, Figura 46: esta pestaña muestra las principales salidas del ensayo en una hoja y tiene el tamaño adecuado para ser impresa directamente en A4. Toma directamente algunos resultados de la pestaña de datos brutos, incluido el valor K_{Jc-1T} equivalente, y si está censurado o no, un gráfico P-COD, temperatura de ensayo, longitud inicial de la grieta (medida en la superficie de la fractura), propiedades del material, etc. También hay áreas específicas para introducir manualmente otros datos de resultados, como una imagen de la superficie de la fractura o la fractografía. Esta pestaña de resumen de datos puede ser convertida a PDF.

S275		KJc	0.16T C(T)	-30 °C	0 LS	CENSORED	FRACTESUS
PARTNER		Test date		dd/mm/yyyy			
P15 - UC (University of Cantabria)		Front Face or LLD		Front face			

MATERIAL PROPERTIES	
Material name	S275
S_y (MPa)	328,4
S_u (Mpa)	518,5
E (Gpa)	207000
ν	0,3
Test temp. (°C)	-30
Test rate (mm/s)	0,85

SPECIMEN GEOMETRY	
W (mm)	8,00
B (mm)	4,00
B ₁ (mm)	4,00

SPECIMEN DETAILS	
Pre-crack length, a_0 (mm)	3,75
a_0/W	0,47

FRACTURE SURFACE	
Longitud de la fisura (mm)	
Medida 1	3,6000
Medida 2	3,6600
Medida 3	3,7600
Medida 4	3,7900
Medida 5	3,8300
Medida 6	3,8200
Medida 7	3,7900
Medida 8	3,7300
Medida 9	3,6100

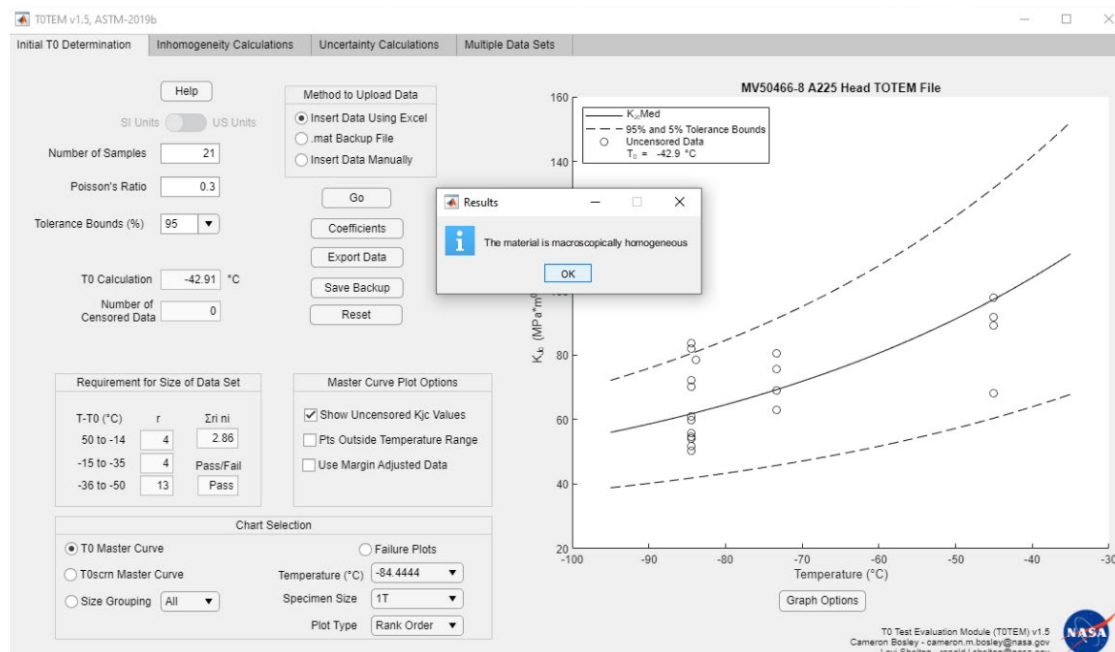
LOAD - COD GRAPH	

RESULT	
K_{Jc-1T} (MPa·m ^{1/2})	72,22
	CENSORED
FRACTOGRAPHY	

Figura 46. Pestaña resumen de datos de cada ensayo K_{Jc} .

3.5.2. Obtención de T_0

Finalmente, se propone la realización del cálculo de T_0 según ASTM E-1921 [16] utilizando el software gratuito NASA T0TEM [23], Figura 47. En el programa se insertan los datos de cada ensayo K_{Jc} individual a partir de una hoja de Excel que incluye todos los ensayos realizados a todas las temperaturas (si son varias) por cada material caracterizado utilizando probetas de $0,16T$ C(T). Para cada ensayo se introducirá la temperatura de ensayo, el valor K_{Jc-1T} y si está censurado o no. El programa, que corre sobre MatLab®, entregará como salida otra hoja Excel con el resumen de los datos introducidos y la temperatura de referencia, entre otros parámetros.



T0TEM	
Property	Value
Initial T0 (°C)	-100,902
Total Samples	25
Number of Samples Between +50/-50°C (N)	22
Number of Uncensored Data (r)	17
Poisson's Ratio	0,3
$\Sigma(r_i n_i)$	2,375
Samples Between $T_i - T_0$ 50 to -14 °C	0
Samples Between $T_i - T_0$ -15 to -35 °C	14
Samples Between $T_i - T_0$ -36 to -50 °C	3
T0scrm (°C)	-92,859
Homogenous or Inhomogeneous	Inhomogeneous

Figura 47. Ejemplo de funcionamiento de la ventana del programa T0TEM (arriba) y de su fichero de salida (debajo).

4. RESULTADOS: PRIMEROS ENSAYOS DE PRUEBA

El fin último, del presente TFM ha sido la puesta a punto de un dispositivo experimental para la realización de ensayos de fractura con probetas Mini-CT a baja temperatura, por lo que los resultados del mismo no pueden ser otros que la realización de un ensayo piloto totalmente funcional.

Para ello, se ha llevado a cabo el ensayo de una probeta 0.16T C(T) a -30°C , cuyos resultados directos (curva Fuerza-COD medida en FF y superficie de fractura) serán presentados someramente en el presente capítulo. Asimismo, se procederá al tratamiento experimental de sus datos y la obtención de la tenacidad K_{Jc} y su correspondiente en el espesor nominal de una pulgada, K_{Jc-1T} , quedando así validados los utillajes diseñados y construidos.

4.1. RESULTADOS DIRECTOS DEL ENSAYO

Para este ensayo de validación se empleó un acero estructural ferrítico-perlítico S275 procedente de la mitad de una probeta C(T) de 25mm de espesor ya ensayada obtenida previamente de una chapa laminadas. La probeta empleada no contenía ranuras laterales.

En una primera instancia la probeta fue prefisurada, controlando la longitud de grieta mediante COD fijado con cuchillas a FF según el método de la flexibilidad, hasta un valor teórico de a/W aproximadamente igual a 0,5 (en el siguiente epígrafe se realizará su medida directa sobre la probeta fracturada). La prefisuración se llevó a cabo a temperatura ambiente según los requerimientos de la norma ASTM E-1921 [16].

Tras ello, se procedió al atemperamiento del conjunto dentro de la cámara ambiental durante un tiempo de 10 minutos una vez alcanzada la temperatura objetivo en el termopar adosado a la horquilla.

Una vez todo dispuesto se llevó a cabo el ensayo mecánico, aplicando una velocidad de sollicitación de 0,002mm/s hasta la rotura de la probeta.

4.1.1. Evaluación de la superficie de fractura y cálculo de a_0

La figura siguiente muestra una macrografía de la superficie de fractura donde pueden apreciarse las diferentes zonas de la probeta: mecanizado por electroerosión por hilo, prefisuración por fatiga y agrietamiento durante el ensayo. En ella se ha procedido a la medida de la longitud de grieta inicial, a_0 , según ASTM E-1921 [16], comprobándose la validez de la misma por estar comprendida en el rango $0,45 \leq a/W \leq 0,55$.

Longitud de la fisura (mm)	
Medida 1	3,6000
Medida 2	3,6600
Medida 3	3,7600
Medida 4	3,7900
Medida 5	3,8300
Medida 6	3,8200
Medida 7	3,7900
Medida 8	3,7300
Medida 9	3,6100



Figura 48. Medida de a_0 a partir de una de las mitades de la probeta mini-CT ensayada.

4.1.2. Obtención de curva carga vs desplazamiento en línea de carga

La Figura 49 muestra la curva carga-COD medido en FF, así como su equivalente corregida a carga-COD medido en la línea de carga, que será la empleada en los análisis siguientes.

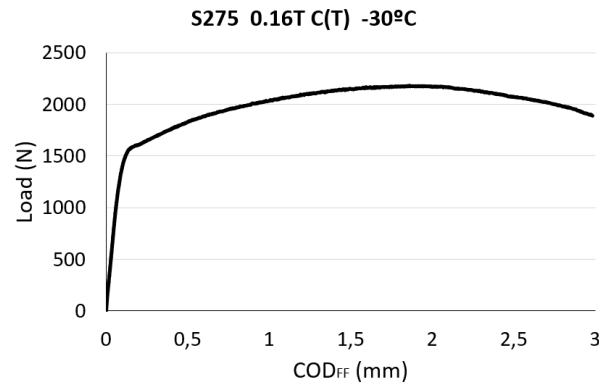


Figura 49. Curva carga- V_{FF} frente a carga- V_{LL} tras aplicación de la corrección [19].

4.2. CÁLCULO DE K_{Jc}

A partir de todos los datos anteriores, se procedió al cálculo de K_{Jc} en el ensayo, obteniendo su equivalente corregido a una pulgada, K_{Jc-1T} , así como las censuras pertinentes.

Puede verse como se obtuvieron valores de $K_{Jc} = 102,90 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ y $K_{Jc-1T} = 72,22 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$, estando estos valores censurados por exceder el valor de K_{Jlimit} . Esto va en consonancia con el evidente desarrollo de plasticidad presente en la macrografía de la superficie de fractura.

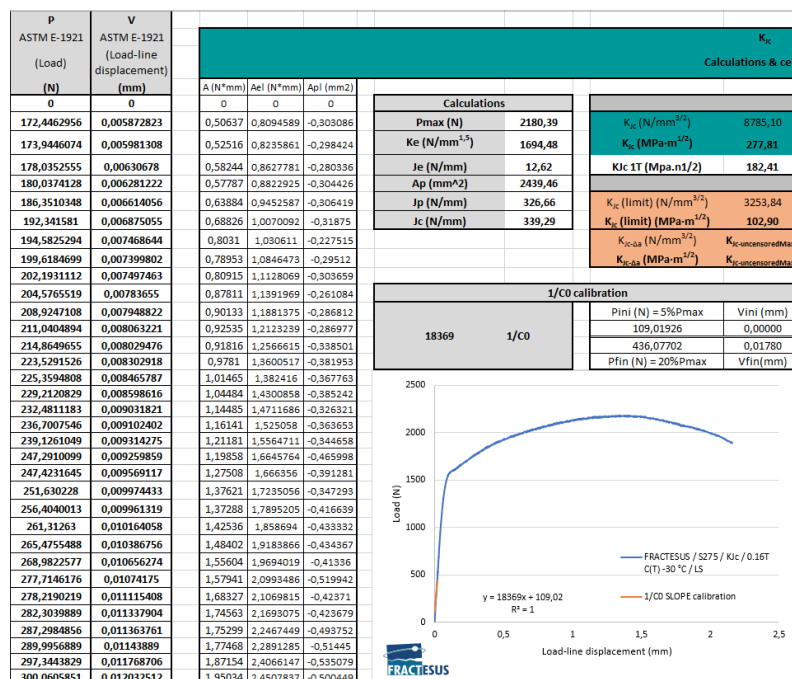


Figura 50. Captura de la hoja de cálculo programada para determinación de K_{Jc} .

K _{Jc}			
Calculations & censures			
TEST RESULT			
K _{Jc} (N/mm ^{3/2})	8785,10	K _{Jc} (MPa·m ^{1/2})	102,90
K _{Jc} (MPa·m ^{1/2})	277,81	K _{Jc-1T} (MPa·m ^{1/2})	72,22
K _{Jc-1T} (MPa·m ^{1/2})	182,41	Censored or not censored?	CENSORED
CENSURES			
K _{Jc} (limit) (N/mm ^{3/2})	3253,84	K _{Jc-limit} Censored?	
K _{Jc} (limit) (MPa·m ^{1/2})	102,90	K _{Jc} ≤ K _{Jc-limit}	CENSORED



Figura 51. Captura de la censura por K_{Jc-limit} ejecutada en la hoja de cálculo

5. CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO

5.1. CONCLUSIONES

En el presente trabajo fin de máster se ha llevado a cabo el diseño, construcción y puesta a punto de un sistema experimental para la realización de ensayos de fractura en probetas 0.16T C(T) en condiciones de temperatura controlada.

El dispositivo ha sido diseñado, construido y validado para llevar a cabo ensayos de acuerdo a la normativa ASTM E-1921 [16], posibilitando la determinación de la temperatura de referencia, T_0 , con todas las garantías.

En primer lugar, se ha llevado una revisión general de la caracterización en fractura de materiales metálicos, particularmente en lo referente a aceros. Ello ha conducido al estudio de las características concretas de las probetas comúnmente conocidas como mini-CT, o ya bien 0.16T C(T), cuyo espesor nominal es de 4mm.

5.1.1. Conclusiones sobre probetas mini-CT

La cuestión abordada, aunque pueda parecerlo en una primera aproximación, no resulta un tema trivial. Sin entrar en detalles de tratamiento de datos ni estadísticos, la minimización de las probetas de fractura conlleva ciertas limitaciones, restricciones y peculiaridades que han debido ser objeto de análisis para la consecución de los citados resultados.

La primera cuestión que se ha tratado tiene que ver con las condiciones de confinamiento de estas probetas de tan reducido espesor; si bien sus dimensiones son proporcionales a las de las probetas C(T) estándar de, por ejemplo, espesor 1T, ello no

implica necesariamente que todas las condiciones de contorno del proceso también lo sean. De hecho, mientras una probeta de dimensiones habituales puede tener un comportamiento predominantemente en deformación plana (excepto una cierta parte de sus bordes que evidentemente nunca lo podrá tener por la falta de material constringente), una probeta mini-CT, de poco espesor, tendrá un comportamiento predominantemente en tensión plana, tal como se indica en la Figura 52.

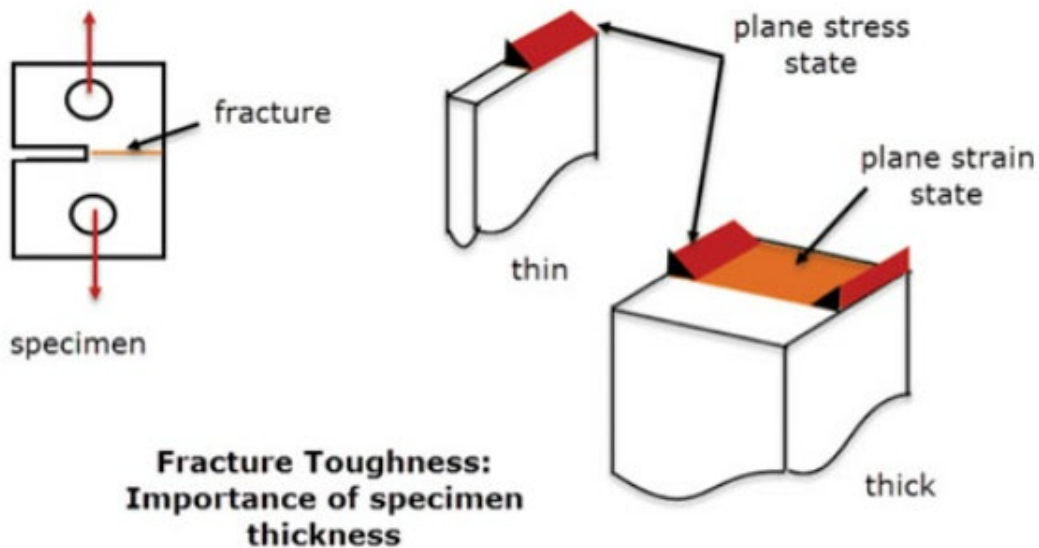


Figura 52. Condiciones de tensión plana y deformación plana en probetas de fractura según su espesor [24].

Ello hace que la tenacidad a fractura determinada a partir de estas probetas arroje resultados superiores a los de la probeta de fractura de referencia, 1T, caracterizada en condiciones análogas. Lo cual supone que la aplicación de los conceptos de temperatura de referencia, T_0 , y Curva Patrón (Master Curve) con esta geometría de probeta miniatura tenga ciertas peculiaridades a la hora de la determinación de los parámetros estadísticos de la distribución de Weibull que lo rigen. Si bien esto escapa del objetivo principal de este TFM, ha sido necesario tenerlo en cuenta a la hora del dimensionamiento y selección de material para los utillajes fabricados, ya que este hecho junto con la reducción de tamaños pueden provocar un aumento en las tensiones locales de ciertos puntos clave de los utillajes donde las fuerzas de contacto cuasi-puntuales pueden verse aumentadas; además, dado que esto provoca que la T_0 pueda verse disminuida frente a la obtenida con probetas convencionales ha sido necesario tener en cuenta unas temperaturas de ensayo más restrictivas de las que se emplearían con probetas de espesor 1T.

Tras todo ello, se ha procedido a la definición de la geometría de probeta Mini-CT. Si bien la mayoría de autores emplean probetas de 4mm de espesor nominal, es cierto que existen pequeñas diferencias en algunas de sus dimensiones. En base a todo ello, se ha propuesto el empleo de la probeta más empleada: espesor $B=4.0\text{mm}$ y anchura $W=2B=8.0\text{mm}$, de acuerdo con ASTM E-1921 [16]. Para el mecanizado de la entalla objeto de la futura grieta, resulta imposible mantener las dimensiones indicadas por la normativa [16], por lo que se propone la utilización electroerosión por hilo con el menor diámetro comercial, 0.1mm, que resulta en mecanizados de un espesor final de 0.2mm aproximadamente.

Respecto al ranurado lateral de las probetas, como aconsejan múltiples autores, se propone no introducir ranuras ya que una reducción de espesor sólo consigue condiciones de tensión plana más importantes, que pueden jugar papeles relevantes.

Sobre la medida del crecimiento de grieta, tanto durante la etapa de prefisuración como de ensayo, existe la posibilidad de controlar el CMOD mediante dos comparadores enfrentados sobre las caras superior e inferior de la probeta en la línea de carga, o ya bien la colocación de un COD en la cara exterior de la probeta. En este caso, se ha optado por colocar un COD fijado a la cara exterior de la probeta en sendas cuchillas mecanizadas en la misma durante su conformado (se desaconsejan las fijaciones atornilladas por la influencia de los orificios roscados en una probeta de tan pequeñas dimensiones).

Si bien, por las citadas razones de practicidad la medida en la cara exterior de la probeta, FF, resulta conveniente, el tratamiento de datos subsiguiente, como en cualquier probeta C(T), se realiza con los datos medidos en la línea de carga, LL. Este problema, abordado ya por Landes [19] y otros hace más de 40 años y recogido en la normativa ASTM E-1921 [16], también ha sido objeto de análisis en el presente TFM, optándose por la aplicación directa de la formulación original propuesta en [19] para el traslado de datos de FF a LL recogido en la expresión:

$$R = \frac{v_{LL}}{v_{FF}} = \frac{a/W + r \cdot (1 - a/W)}{a/W + r \cdot (1 - a/W) + X/W}$$

donde $r \cdot (W-a)$ es la distancia del punto de rotación desde la punta de la grieta, y X el desplazamiento entre la cara frontal y la línea de carga. En cualquier caso, tal como se establece en [16], si así se desea este valor puede ser aproximado por $R=0,73$ para la geometría de probeta elegida (ya que es el resultante para los valores nominales de $a/W=0,5$ con $X/W = 0,25$ y $r = 0,3519$).

5.1.2. Conclusiones sobre la puesta a punto experimental

Una vez analizados todos los aspectos anteriores debe hacerse hincapié en que, si bien el grupo donde se ha desarrollado el TFM posee más de tres décadas de experiencia en la realización de ensayos de fractura, es pionera la realización de estos ensayos en probetas 0.16T C(T) en su seno. Como ya se ha indicado, la cuestión de la miniaturización no es trivial, por ello se ha procedido a un proceso de diseño, construcción, testeo y re-diseño iterativo con los todos los elementos del utillaje construido y validado.

Algunos elementos como útiles transmisores de esfuerzos o uniones roscadas no han representado ni mucho menos un reto, ya que se ha optado por soluciones habituales: varillaje roscado de métrica convencional y aseguramiento de al menos seis filetes por cada unión roscada para evitar el arrancamiento, así como diámetros mínimos de Ø8mm en todos los componentes (salvo pasadores por restricciones geométricas de la probeta).

Otros, sin embargo, han sido fruto de optimizaciones del diseño forzadas por varias secuencias de prototipado con resultados pocos satisfactorios. Particularmente, el caso de las horquillas ha supuesto un reto, ya que la geometría estrictamente de acuerdo con la normativa presentaba incompatibilidades funcionales graves relacionadas con la resistencia de los esfuerzos durante el ensayo y la compatibilidad de un COD universal. Por ello, se procedió a la modificación de la misma sin contradecir a la normativa pero posibilitando los factores anteriormente citados, lo que obligó al alargamiento de los pasadores, lo cual provocaba en ellos unas flechas incompatibles con la realización de los ensayos y un movimiento lateral de la probeta excesivo. Finalmente, en una tercera iteración, esto fue corregido llegando a una solución de compromiso que, sin contraponerse a los requerimientos de la normativa, permitía una correcta respuesta experimental; básicamente se consiguieron unas horquillas con patillas bastante generosas y un alojamiento en uno de sus lados para la fijación de un COD universal en la cara lateral de la probeta.

De cara a la aplicación del ambiente, ha decidido usarse una cámara de reducidas dimensiones para albergar tanto la probeta como los útiles de ensayo colocando un termopar para controlar la temperatura adherido a las horquillas. La citada cámara es refrigerada mediante inyección de nitrógeno líquido gaseoso y posee una regulación mediante un controlador electrónico de $\pm 1^\circ\text{C}$.

Finalmente, también ha sido programada una hoja Excel para la determinación de la tenacidad obtenida de cada ensayo de acuerdo a la normativa ASTM E-1921 [16],

aplicando las censuras correspondientes. Por otro lado, para la determinación de la temperatura de referencia, T_0 , se propone la aplicación del software T0TEM de la NASA [23].

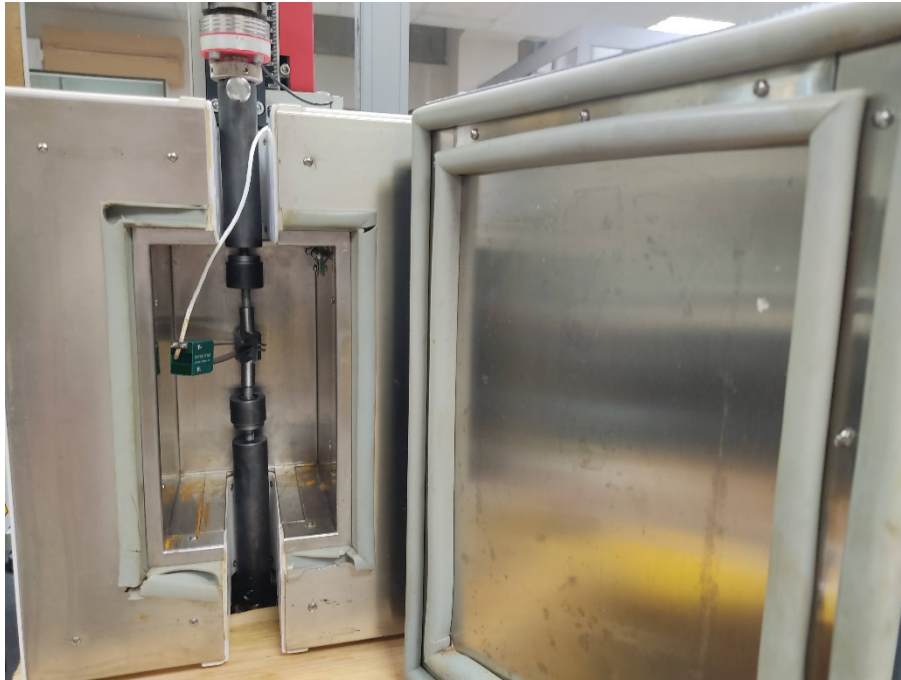


Figura 53. Imagen del prototipo experimental preparado para un ensayo a bajas temperaturas.

5.2. TRABAJO FUTURO

Las acciones futuras resultan evidentes, no son otras que el uso del sistema experimental concebido para la determinación de la tenacidad a fractura mediante el uso de probetas mini-CT.

Los trabajos desarrollados se encuadran dentro de las acciones experimentales del proyecto europeo FRACTESUS [18], que va enfocado en pro a la implementación en la futura normativa de las probetas miniatura, más concretamente mini-CT, en los programas de vigilancia de aceros de vasija. En él, la Universidad de Cantabria (grupo LADICIM) va a llevar a cabo la caracterización de, al menos, 5 aceros no irradiados para la determinación de la temperatura de referencia con esta geometría de probeta miniatura, trabajando después en los modelos experimentales para correlacionar sus resultados con los obtenidos a partir de probetas compactas de espesores habituales (0.5T, 1T, 2T, 4T).

6. BIBLIOGRAFÍA

- [1] M. Yamamoto, «A round robin program of master curve evaluation using miniature C(T) specimens first round robin test on uniform specimens of reactor pressure vessel material,» *ASME 2013 Pressure Vessels and Piping Conference*, 2013.
- [2] Dr. Marlies Lambrecht, «FRACTESUS,» *Fracture mechanics testing of irradiated RPV steels*, 2020.
- [3] W. K., «Fracture Toughness Transition Curve Shape for Ferritic Structural Steels.,» *In: Teoh S.H., Lee K.H. (eds) Fracture of Engineering Materials and Structures.*, 1991.
- [4] R. K. J. a. R. J. Ritchie, «On the Relationship Between Critical Tensile Stress and Fracture Toughness in Mild Steel,» *J. Mech. Phys. Solids*, 1973.
- [5] K. Wallin, « The scatter in KIC-results.,» *Engineering Fracture Mechanics*, 1984.
- [6] E. L. R. C. E. v. W. R. G. M. Scibetta, «Use of Broken Charpy V-notch Specimens from a Surveillance Program for Fracture Toughness Determination,» *J. ASTM Int.*, 2006.
- [7] ASTM, «ASTM E-399-97,» *Method for fracture determination ...*, 2019.
- [8] UNE-EN ISO 12737, Materiales metálicos. Determinación de la resistencia a la fractura por deformación plana., 2011.

- [9] Fracture mechanics toughness tests - Method for determination of K_{Ic} , critical CTOD and critical J values of welds in metallic materials, 1997.
- [10] J. J. G. J. L. Arana, Mecánica de la fractura, Servicio editorial UPV.
- [11] D. R. Salvador, Tesis doctoral "Caracterización de un acero español de activación reducida mediante el uso de probetas miniatura", 2013.
- [12] R. L. Calderón, Tesis doctoral "DETERMINACIÓN DE LAS PROPIEDADES DE TRACCIÓN Y FRACTURA DE MATERIALES METÁLICOS MEDIANTE ENSAYOS SMALL PUNCH", 2012.
- [13] M. Yamamoto et al., «A ROUND ROBIN PROGRAM OF MASTER CURVE EVALUATION USING MINIATURE C(T) SPECIMENS -2ND REPORT: FRACTURE TOUGHNESS COMPARISON IN SPECIFIED LOADING RATE CONDITION,» *Proceedings of the ASME 2013 Pressure Vessels and Piping Conference*, 2013.
- [14] R. Lacalle et al., Paper fractura SPT, 2011 GEF.
- [15] «NIST - Pipeline Safety,» [En línea]. Available: <https://www.nist.gov/programs-projects/pipeline-safety>.
- [16] A. E. -. 21, Standard Test Method for Determination of Reference Temperature, T_0 , for Ferritic Steels in the Transition Range.
- [17] P. Arffman, FRACTESUS P3-VTT, «Deliverable D.2.1,» Test matrix of FRACTESUS, CA No. 900014, 2021.
- [18] FRACTESUS, Deliverable 6.9 - Testing protocols and reporting formats, 2020.
- [19] Landes, J. D., « J Calculation from Front Face Displacement Measurements of a Compact Specimen,» *International Journal of Fracture*, vol. 16, pp. 183-186, 1980.
- [20] Karl-Heinz Decker, «Elementos de máquinas,» Ed. Urmo S.A. de Ediciones, 1975.
- [21] K. O. K. Y. T. O. Y. M. N. M. M. Yamamoto, «A ROUND ROBIN PROGRAM OF MASTER CURVE EVALUATION USING MINIATURE C(T) SPECIMENS -2ND REPORT: FRACTURE TOUGHNESS COMPARISON IN SPECIFIED LOADING

RATE CONDITION,» Proceedings of the ASME 2013 Pressure Vessels and Piping Conference, PVP 2013, pp. PVP2013-97, 2013.

[22] Microsoft corporation, «Ms Excel,» *hoja de cálculo*, versión 2019.

[23] N. t. t. program, «T0TEM - T0 Test Evaluation Module,», 2021.

[24] <https://www.digitalengineering247.com/article/simplifying-fea-models-plane-stress-and-plane-strain/>, Consultada el 06-09-2021.